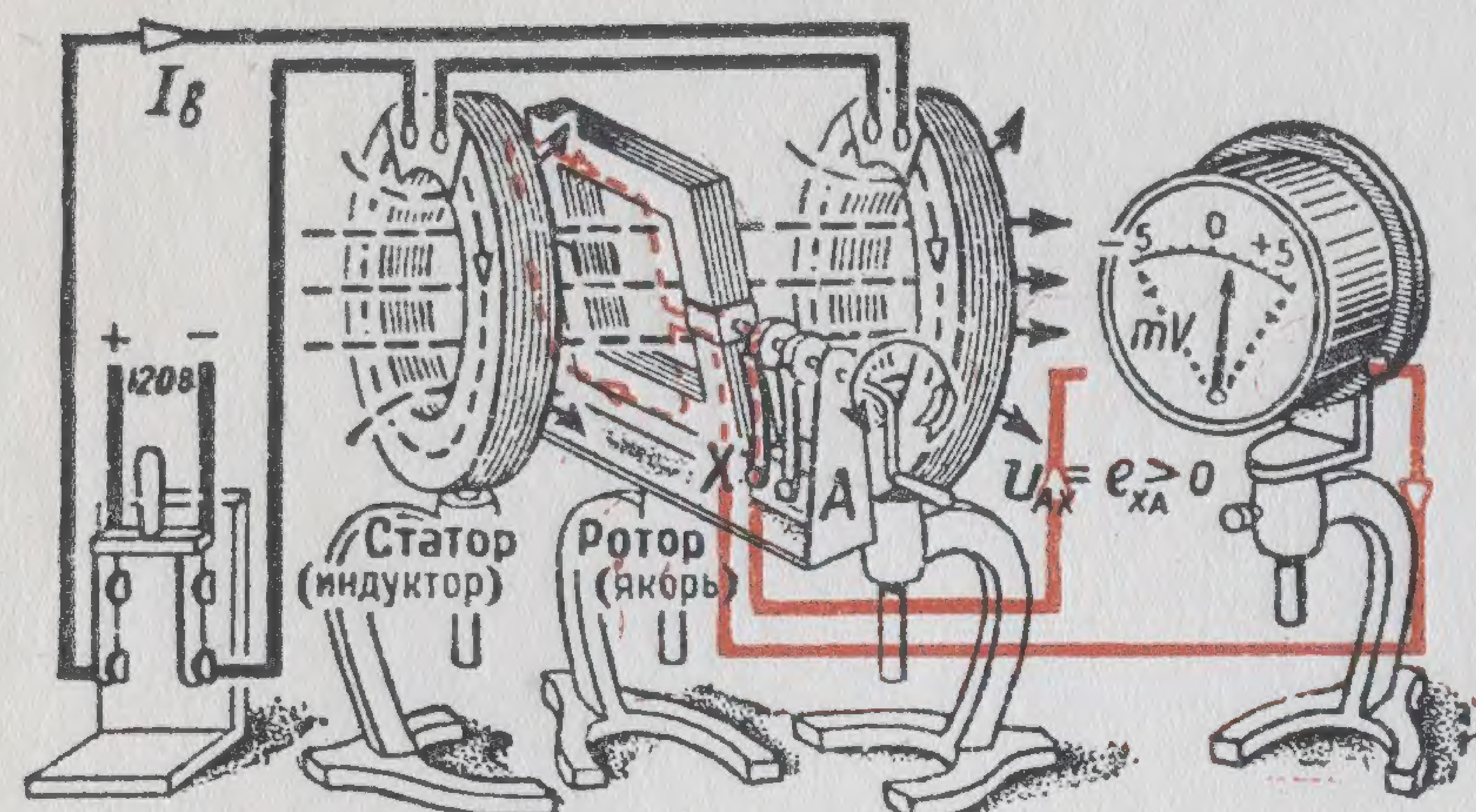
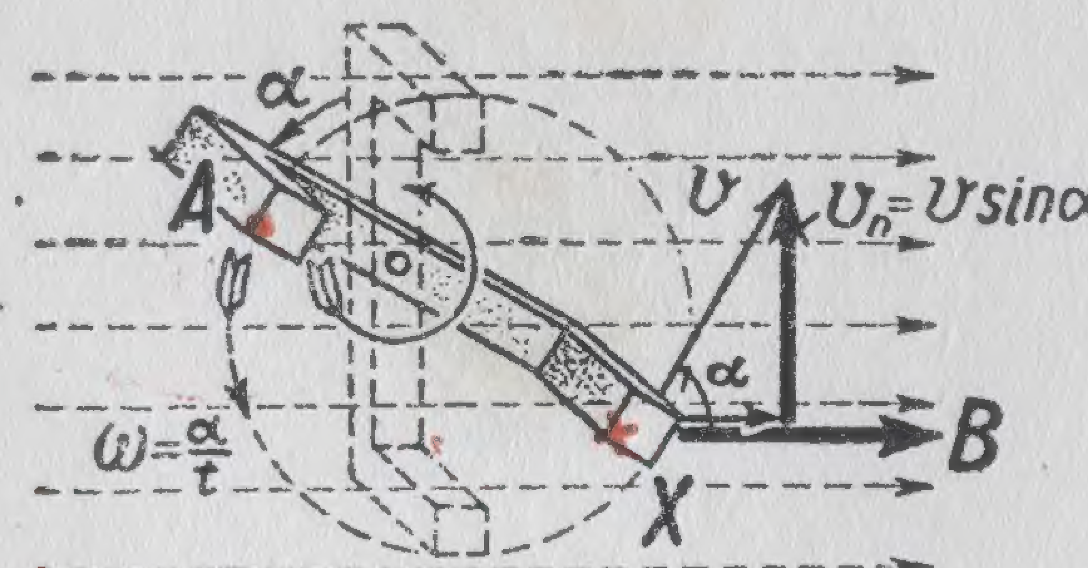
ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

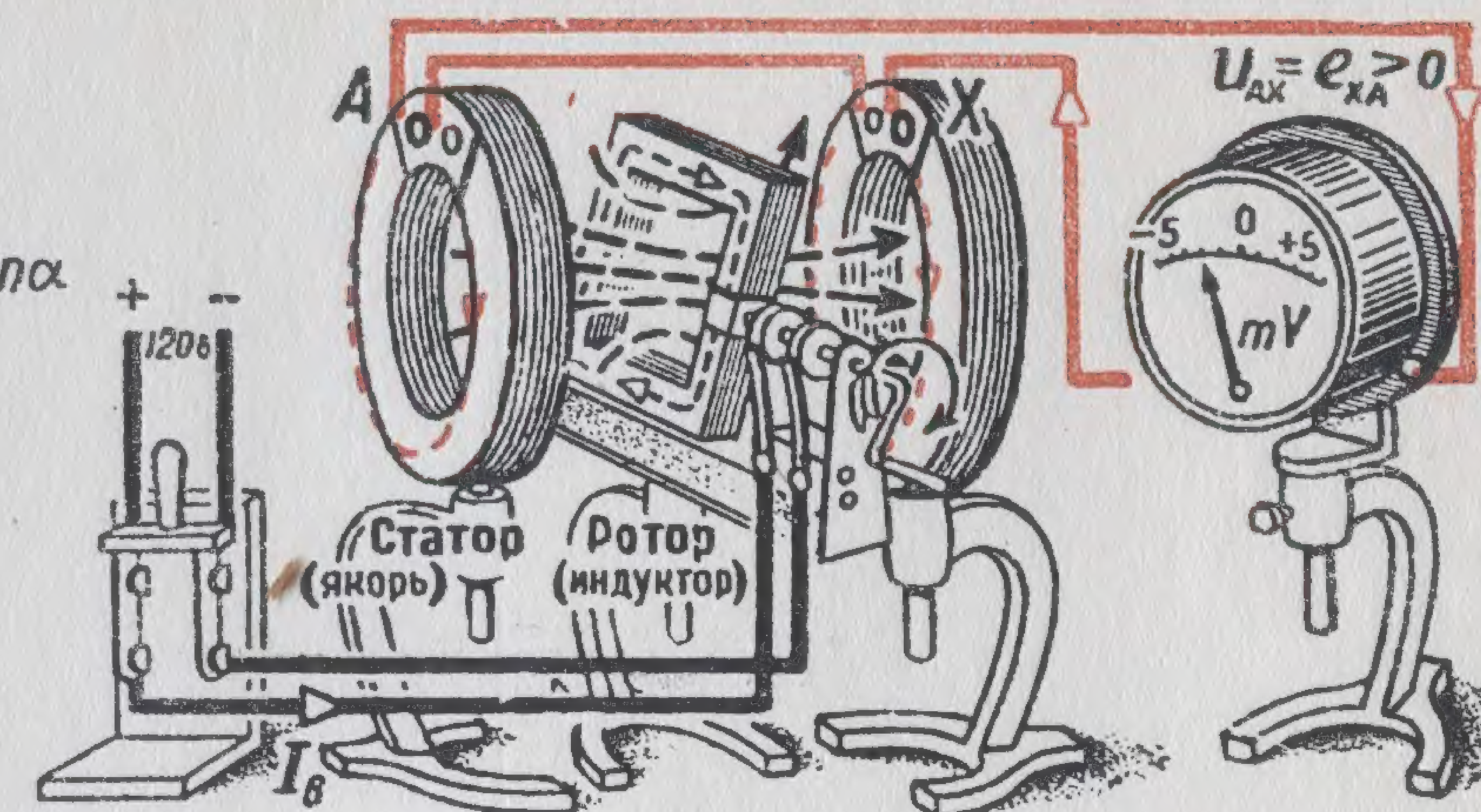


Наведение э.д.с. в якоре, вращающемся в магнитном поле неподвижного индуктора

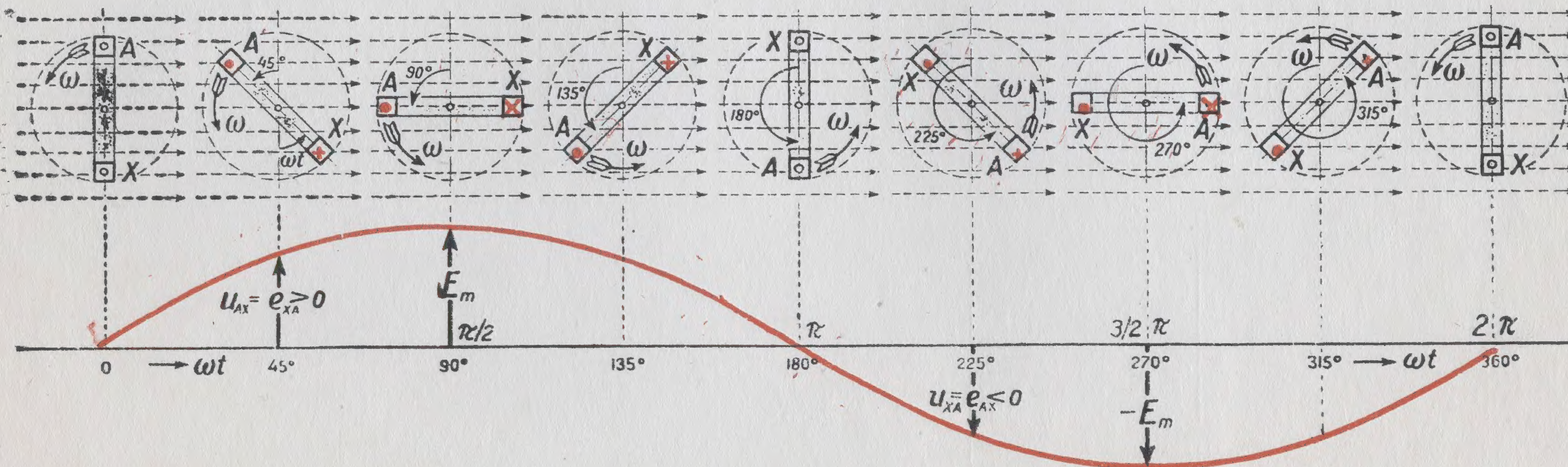


$$e=Blv_n=Blv\sin\alpha=E_m\sin\omega t \text{ в}$$

э.д.с., наводимая в витке, равномерно вращающемся в однородном магнитном поле



Наведение э.д.с. в неподвижном якоре при вращающемся индукторе

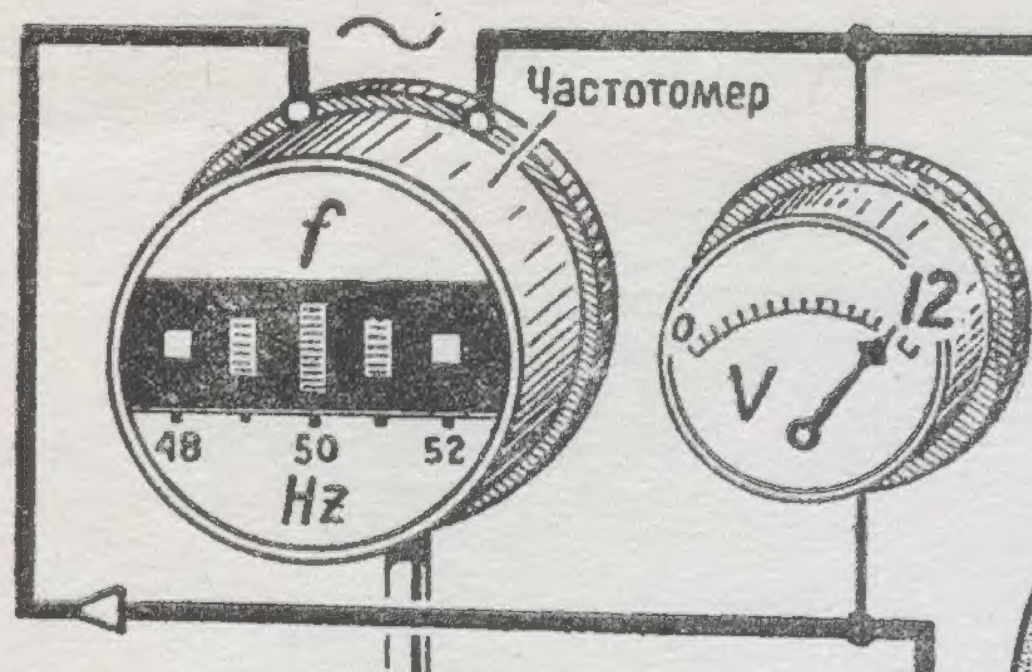


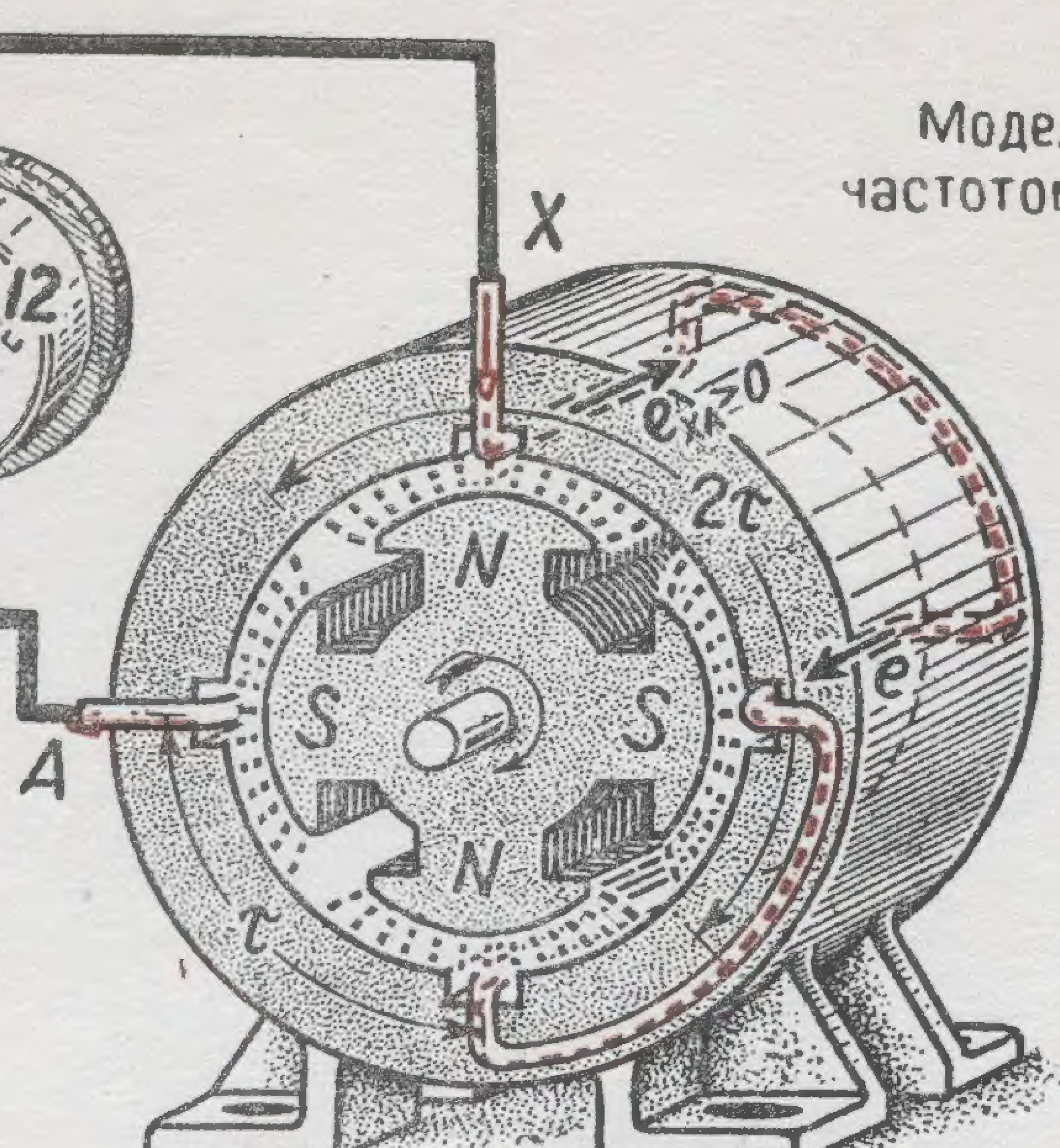
Синусоидальная кривая изменения э.д.с., индуктируемой в обмотке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле

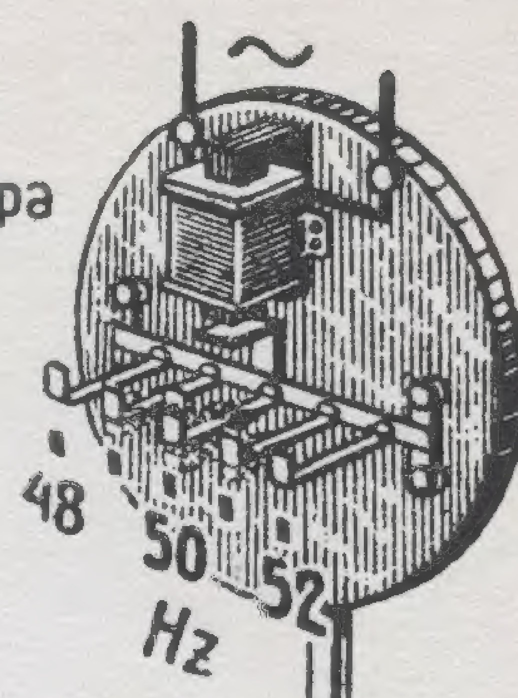
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ПРОСТЕЙШИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА









$2p=2$; $n=3000$ об/мин.
Двухполюсный генератор

$2p=4$; $n=1500$ об/мин.
Четырехполюсный генератор

$2p=6$; $n=1000$ об/мин.
Шестиполюсный генератор

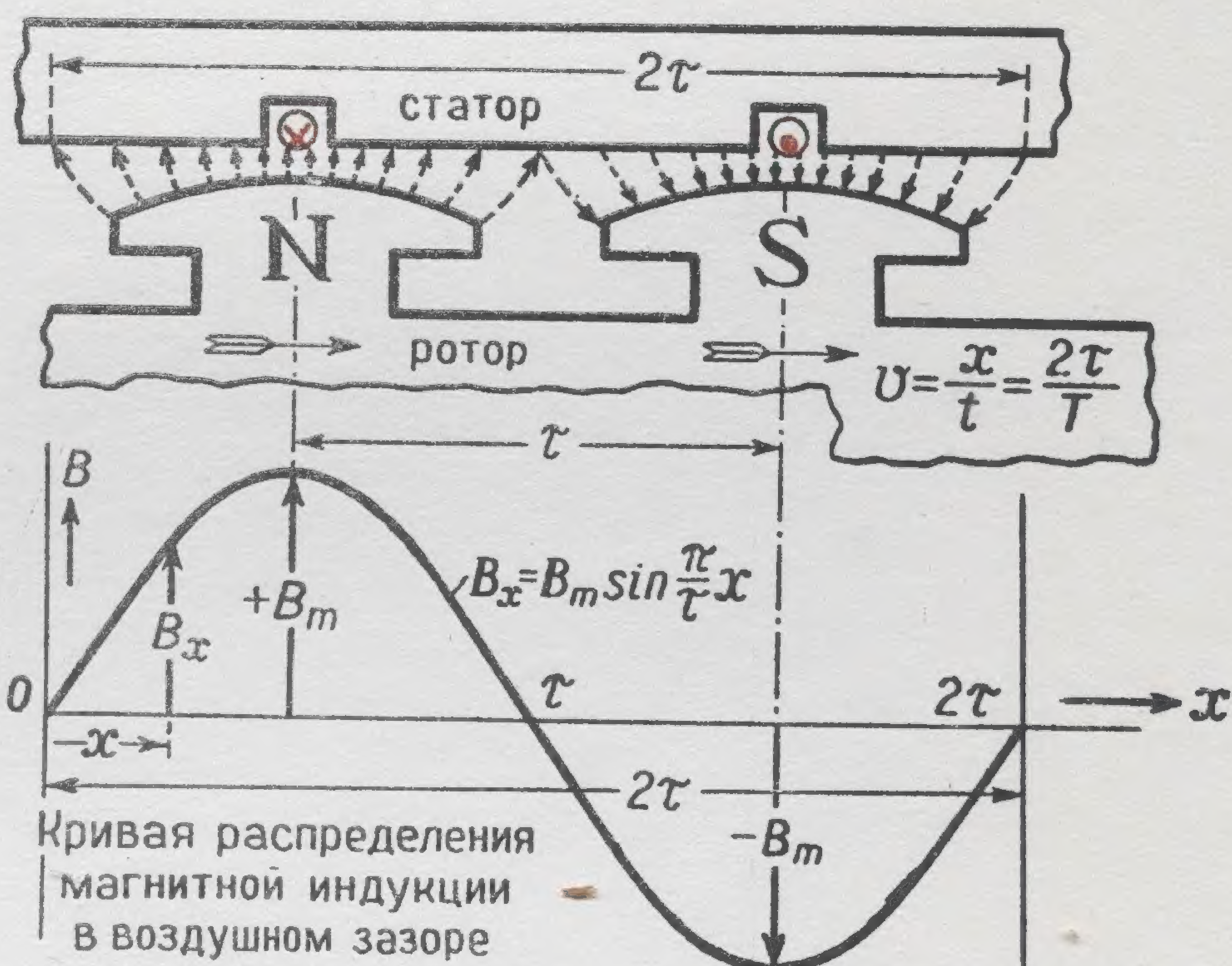
Частота $f=\frac{pn}{60}$ гц

Период $T=\frac{1}{f}$ сек

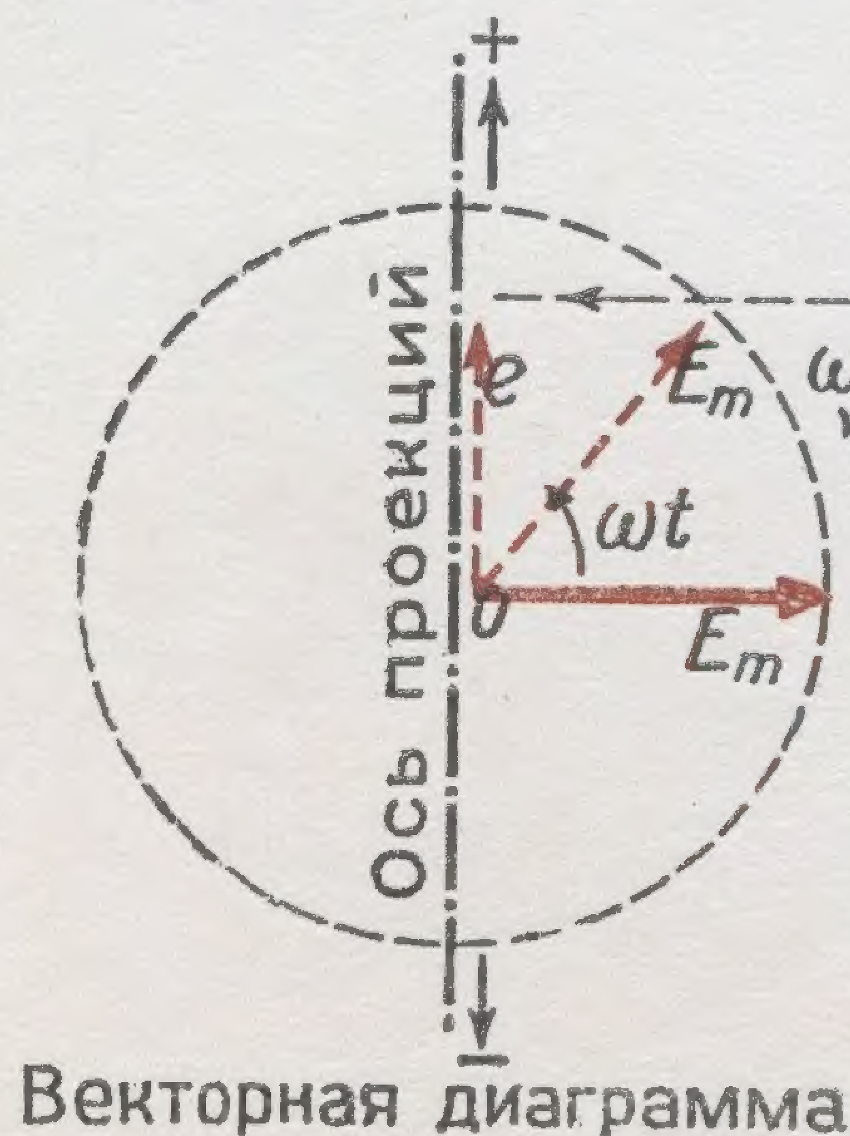
Угловая частота $\omega=2\pi f$ $сек^{-1}$

При стандартной частоте
$f=50$ гц; $T=0{,}02$ сек; $\omega=314$ $сек^{-1}$

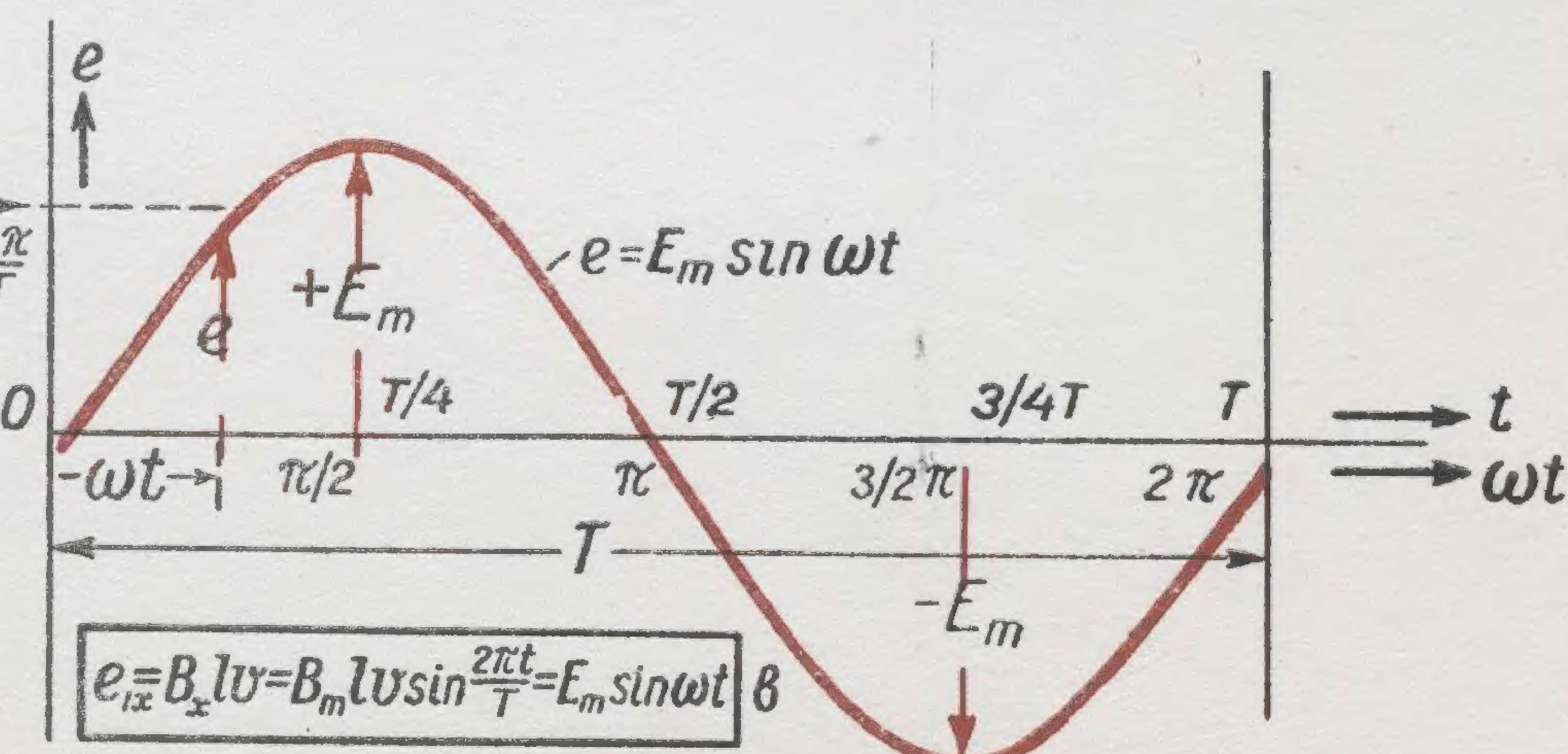
e — мгновенная ЭДС
E_m — амплитуда
ωt — фаза



Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре



Векторная диаграмма

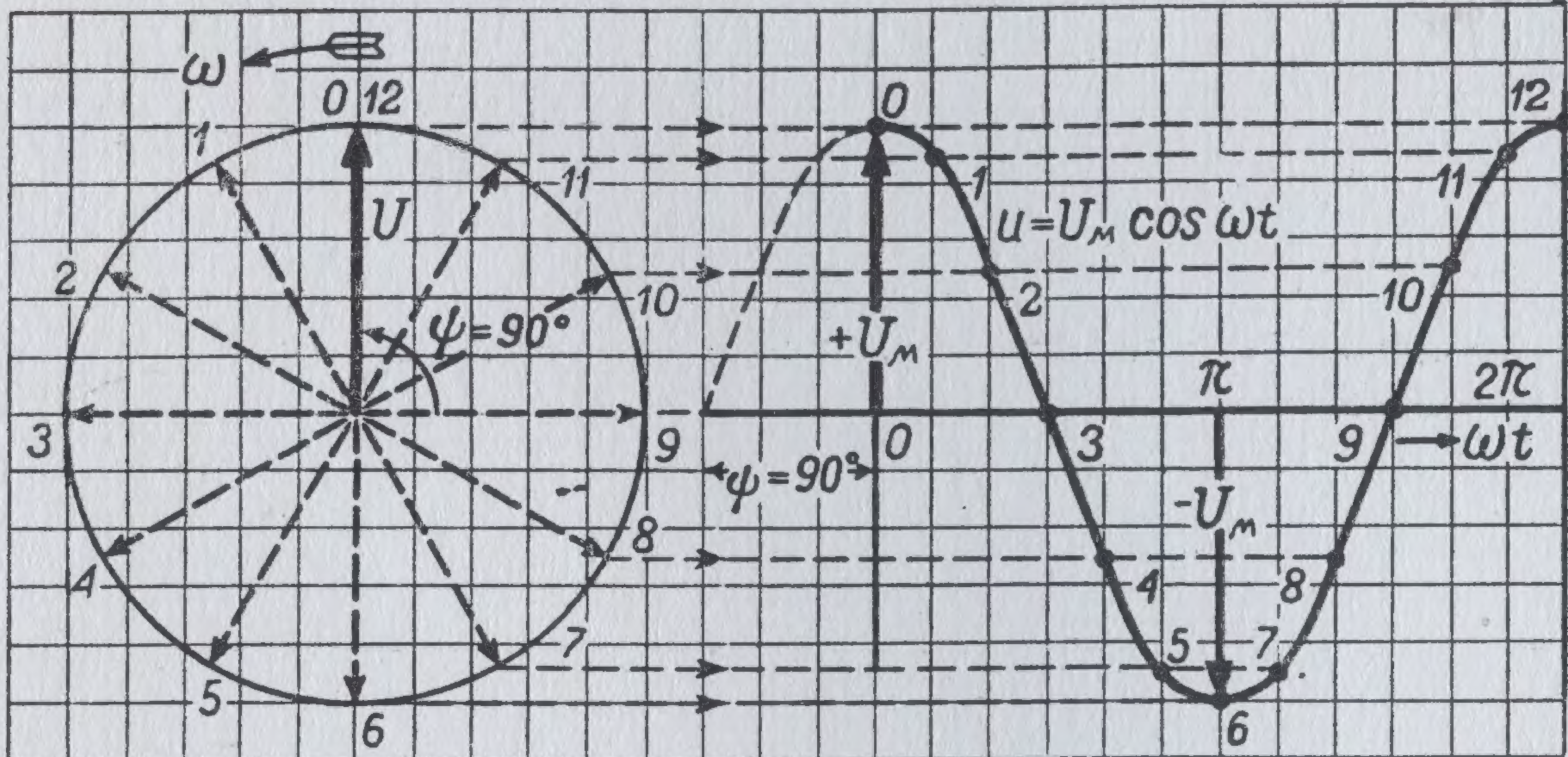


Кривая изменения во времени индуктируемой э.д.с. (линейная диаграмма)

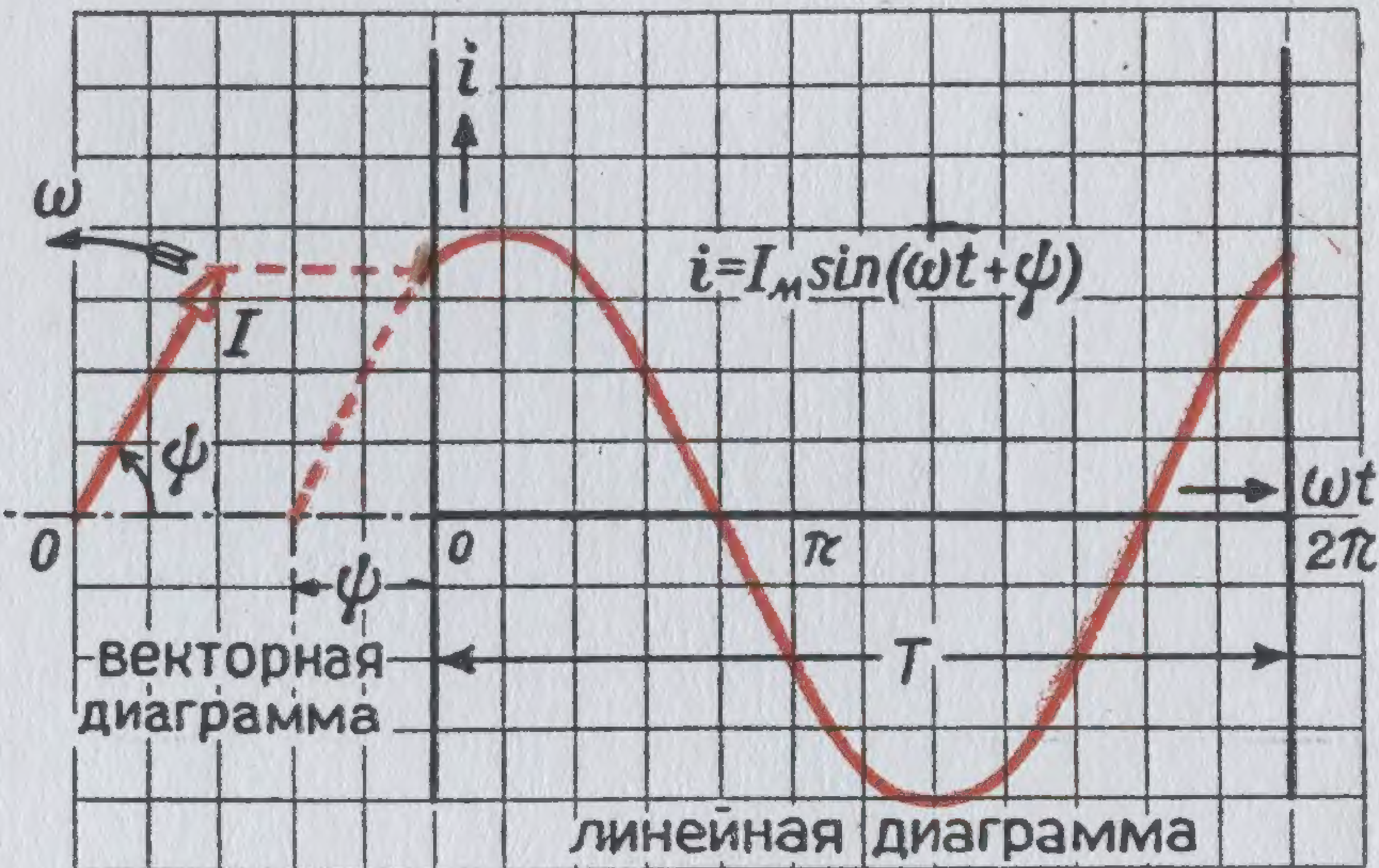
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

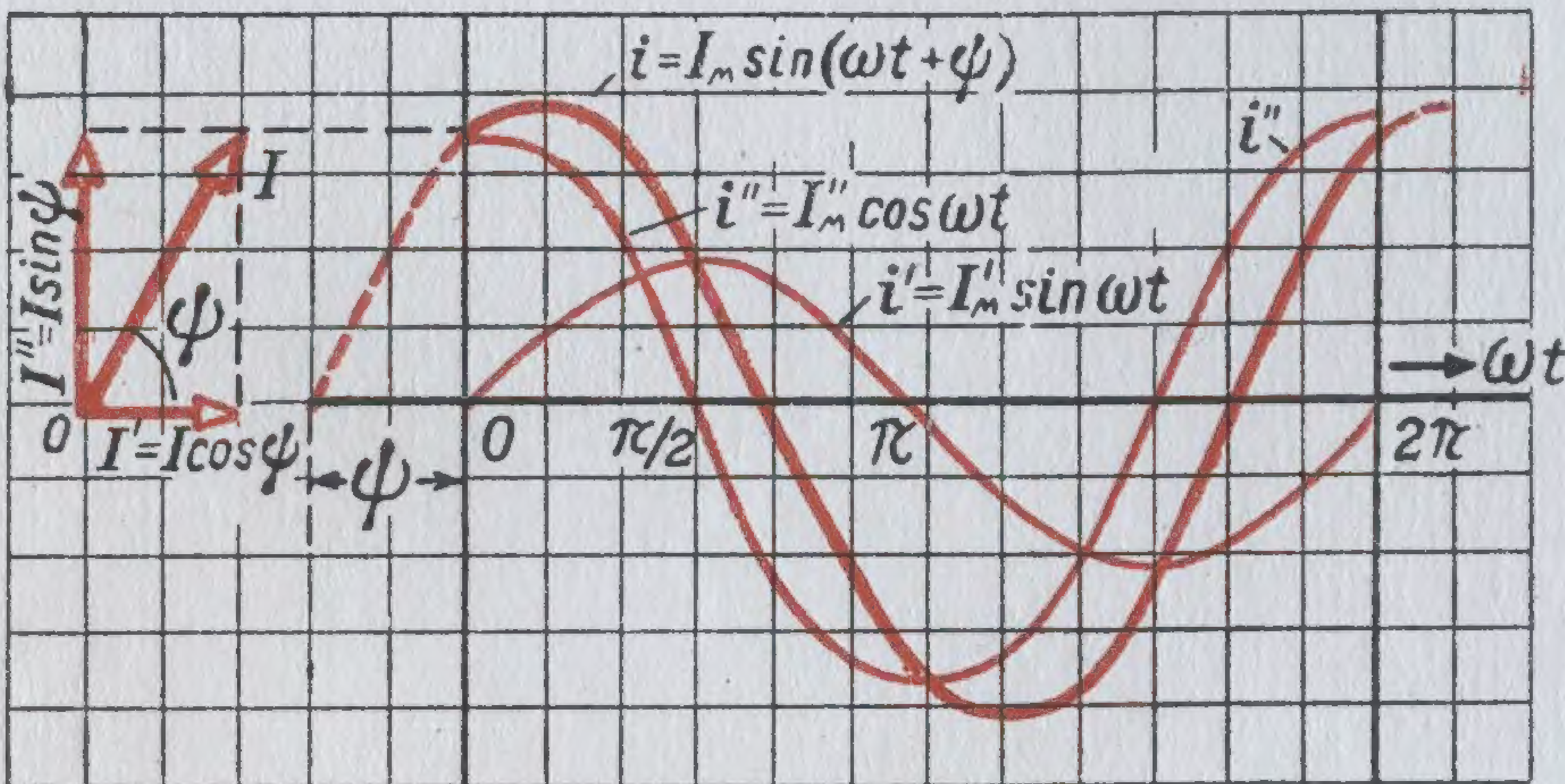
ВЕКТОРНЫЕ И ЛИНЕЙНЫЕ ДИАГРАММЫ



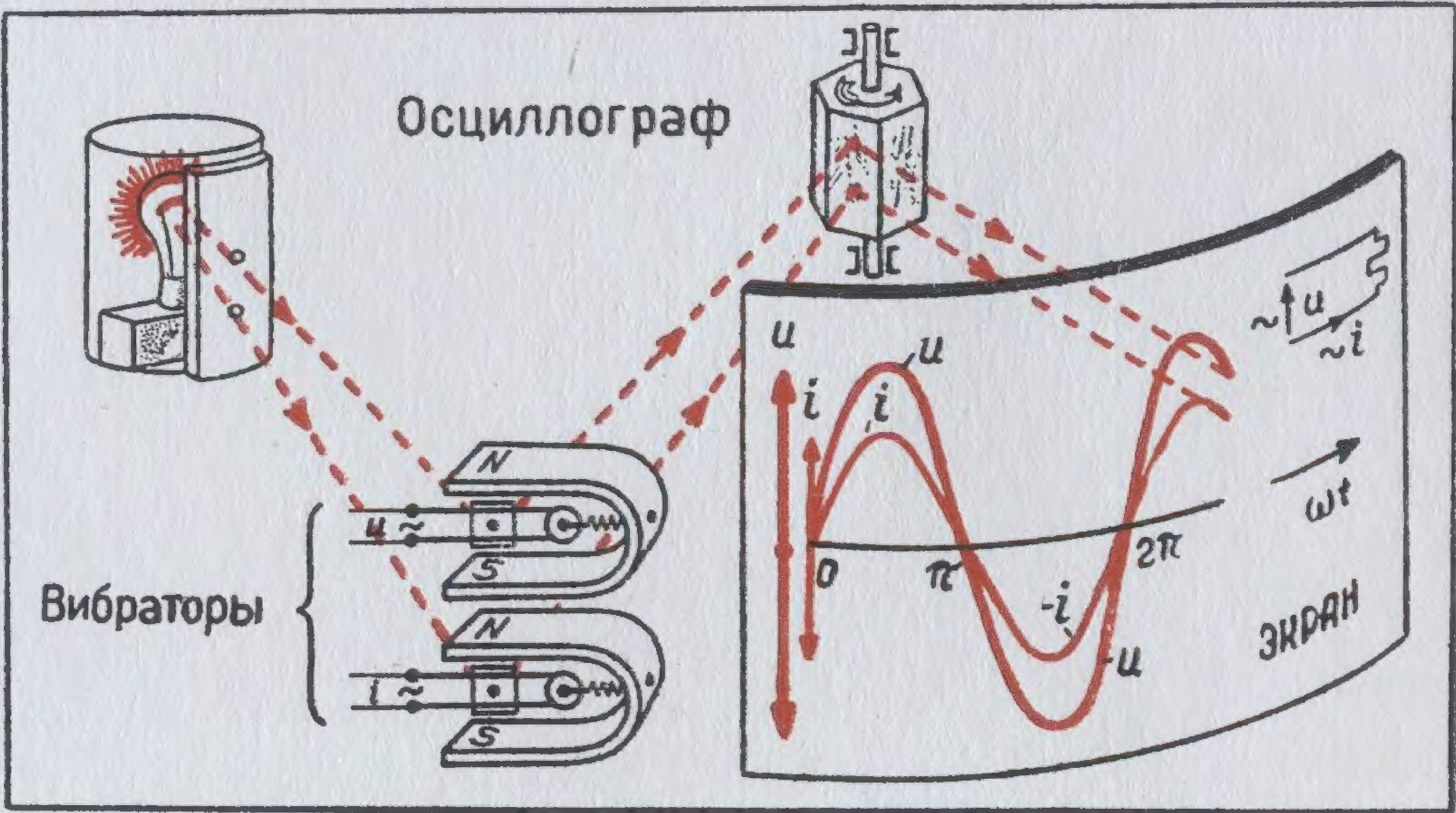
Синусоида с начальным фазовым углом в 90° (косинусоида)



Синусоида с начальным фазовым углом ψ



Разложение синусоиды с начальным фазовым углом на составляющие синусоиду и косинусоиду

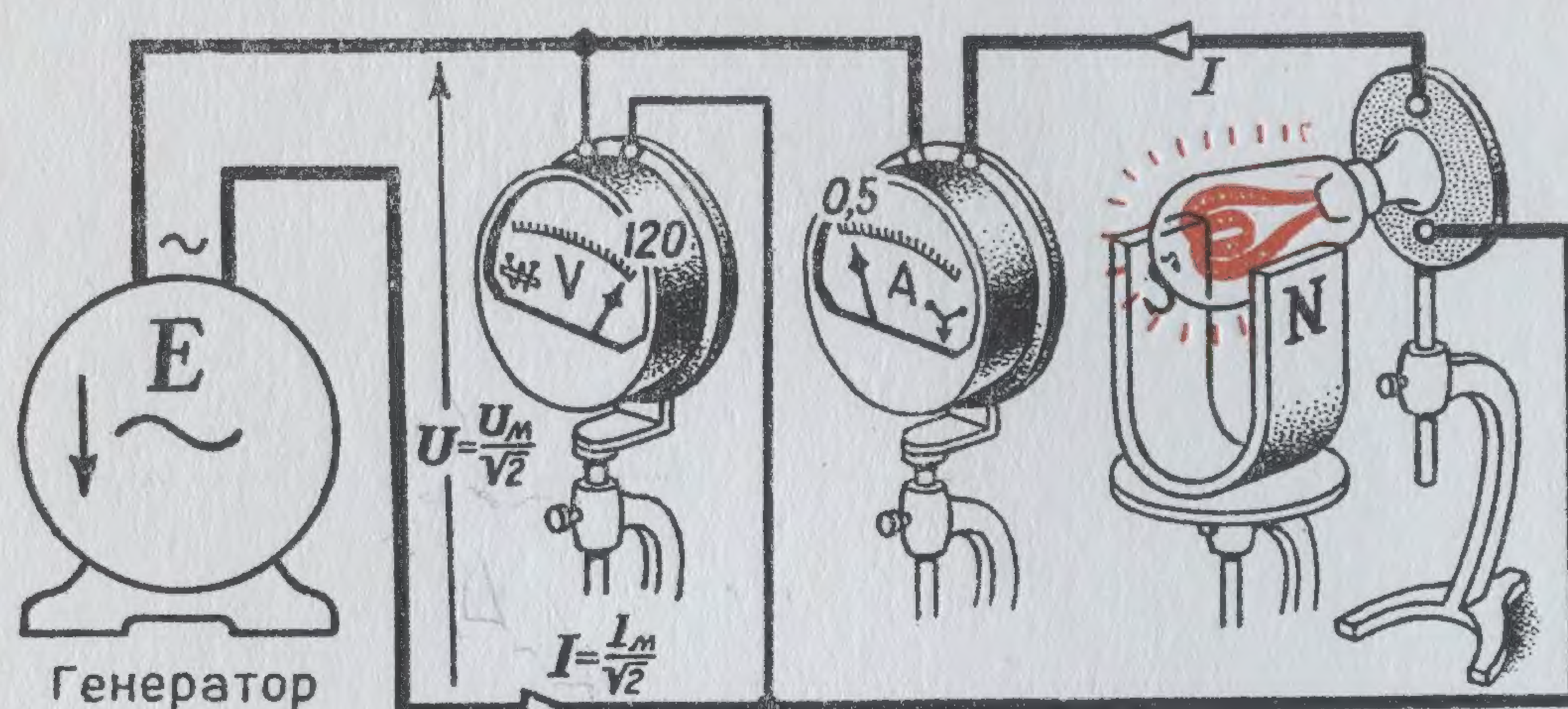


Получение кривых тока и напряжения

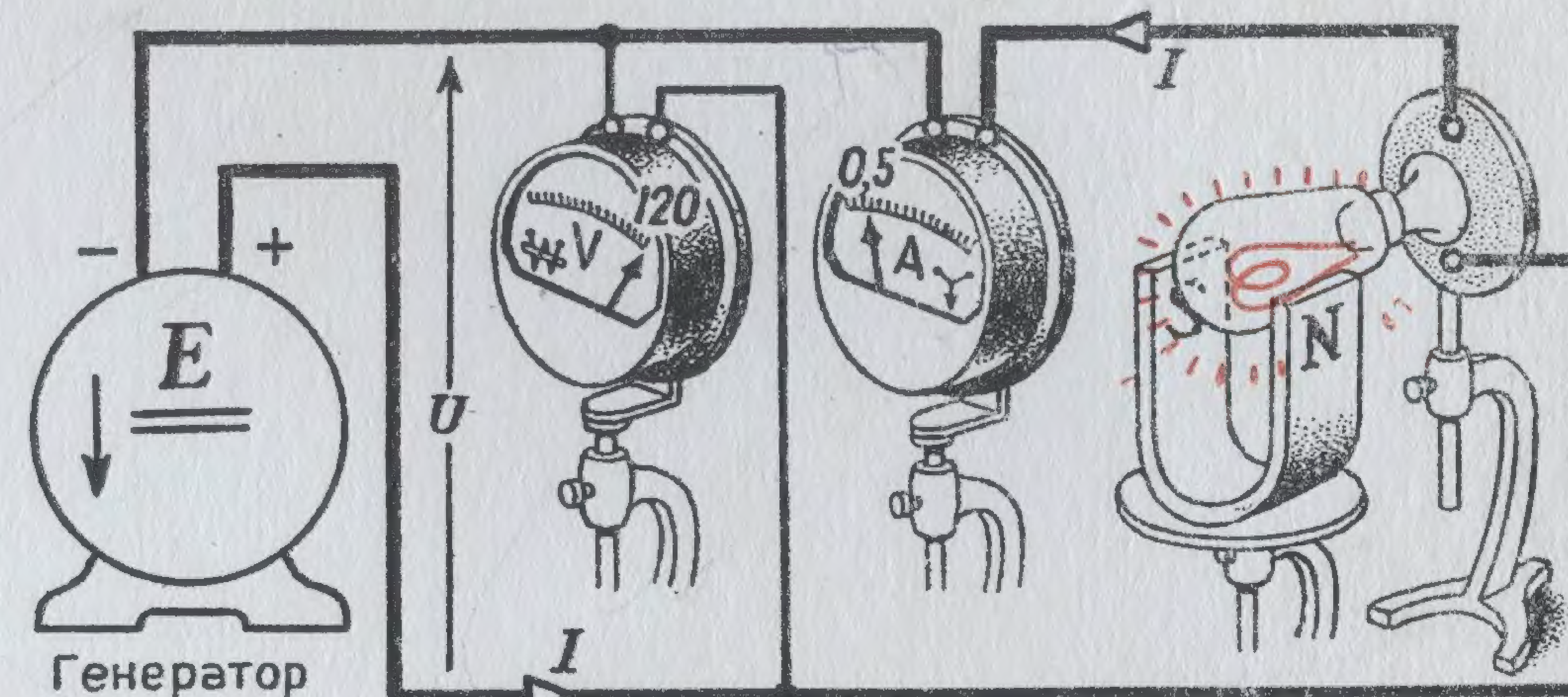
Э.И. Расовский

Худ А. Меньшиков

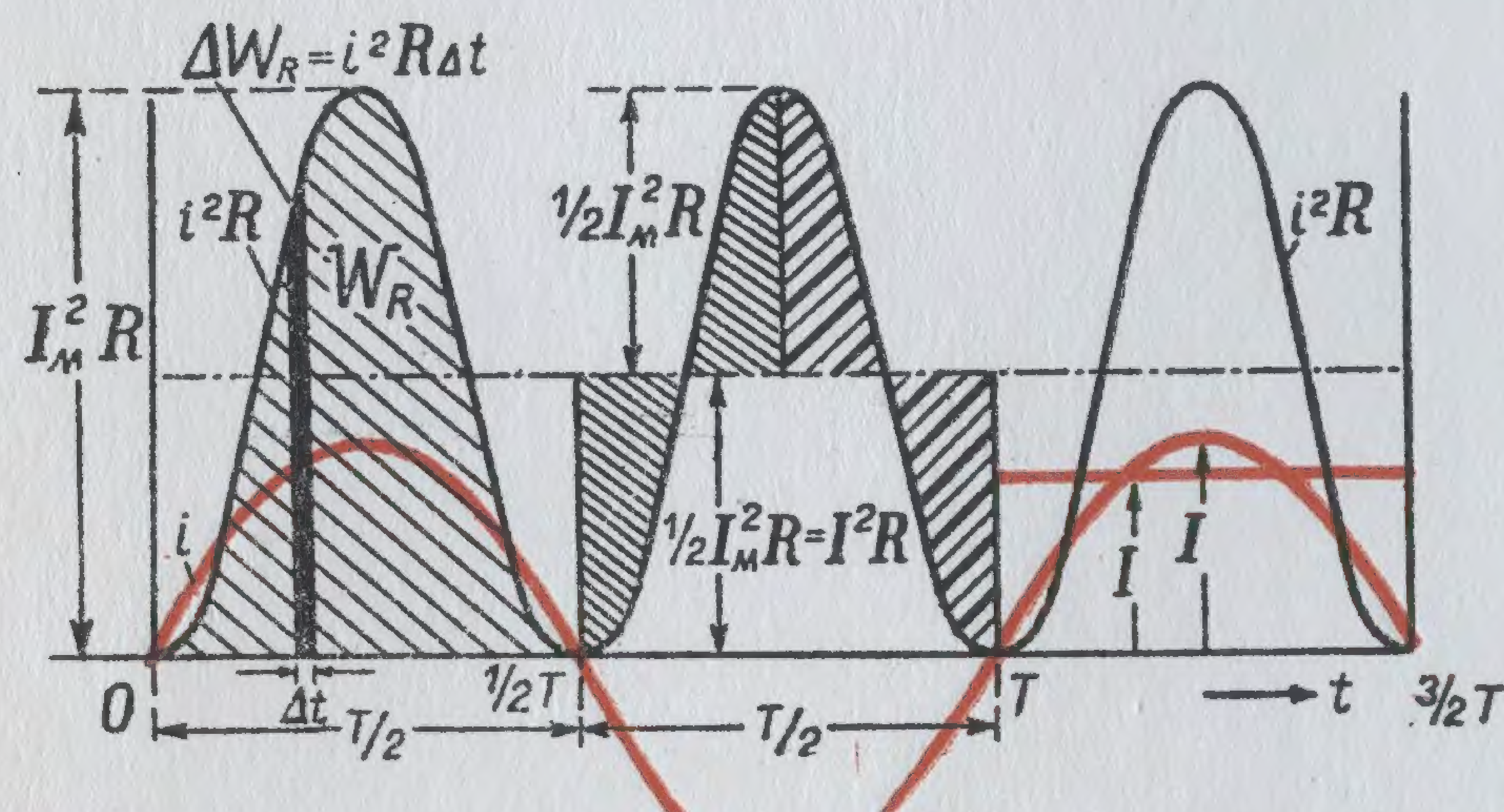
ДЕЙСТВУЮЩЕЕ И СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ИЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

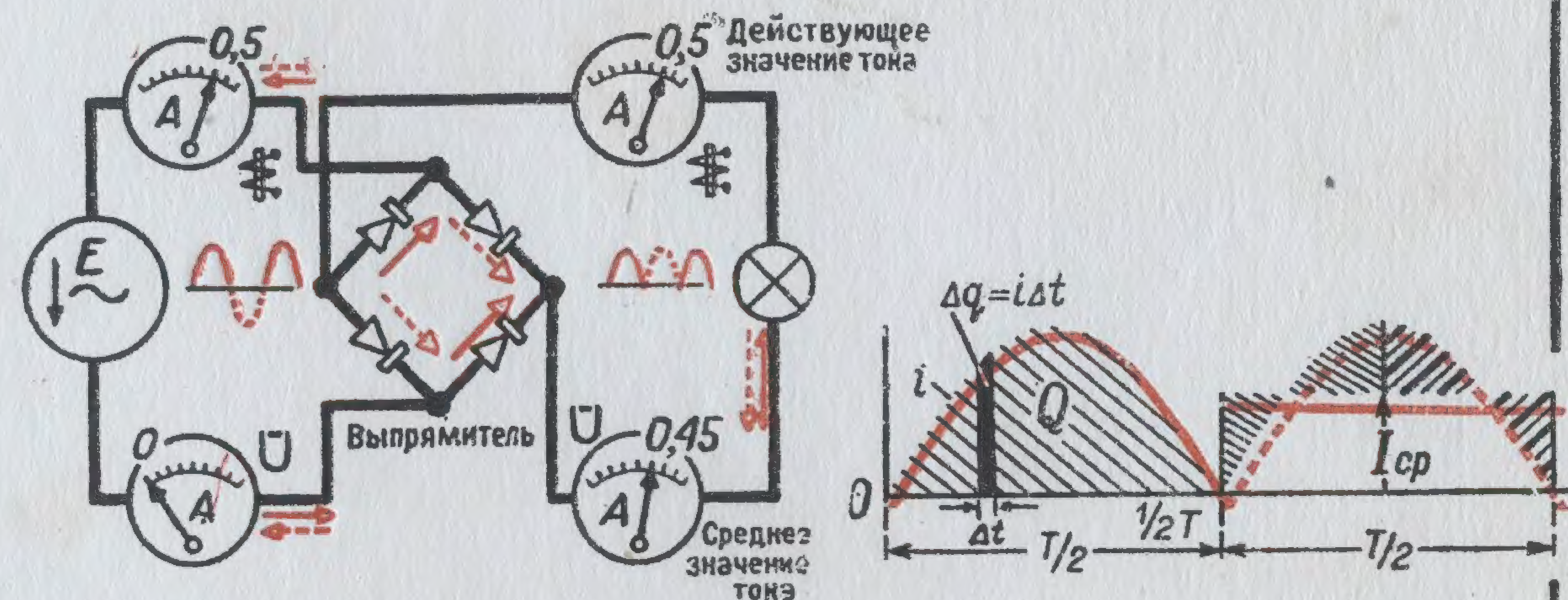


Действующие значения переменного тока и напряжения



Эквивалентный постоянный ток





$$I^2R = \frac{1}{T}\sum_0^T i^2R\cdot\Delta t = \frac{1}{2} I_м^2 R \quad вт$$

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_м \quad а$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T/2}\sum_0^{T/2} i\cdot\Delta t = \frac{Q}{T/2} = \frac{I_м}{\pi/2} = 0{,}636 I_м = 0{,}9 I \quad а$$

$$\frac{1}{T}\sum_0^T i\cdot\Delta t = 0 \quad а$$

ДЕЙСТВУЮЩИМ (эффективным) значением переменного тока называется величина эквивалентного постоянного тока, который в течение периода производит то же тепловое и динамическое действие, что и рассматриваемый переменный ток

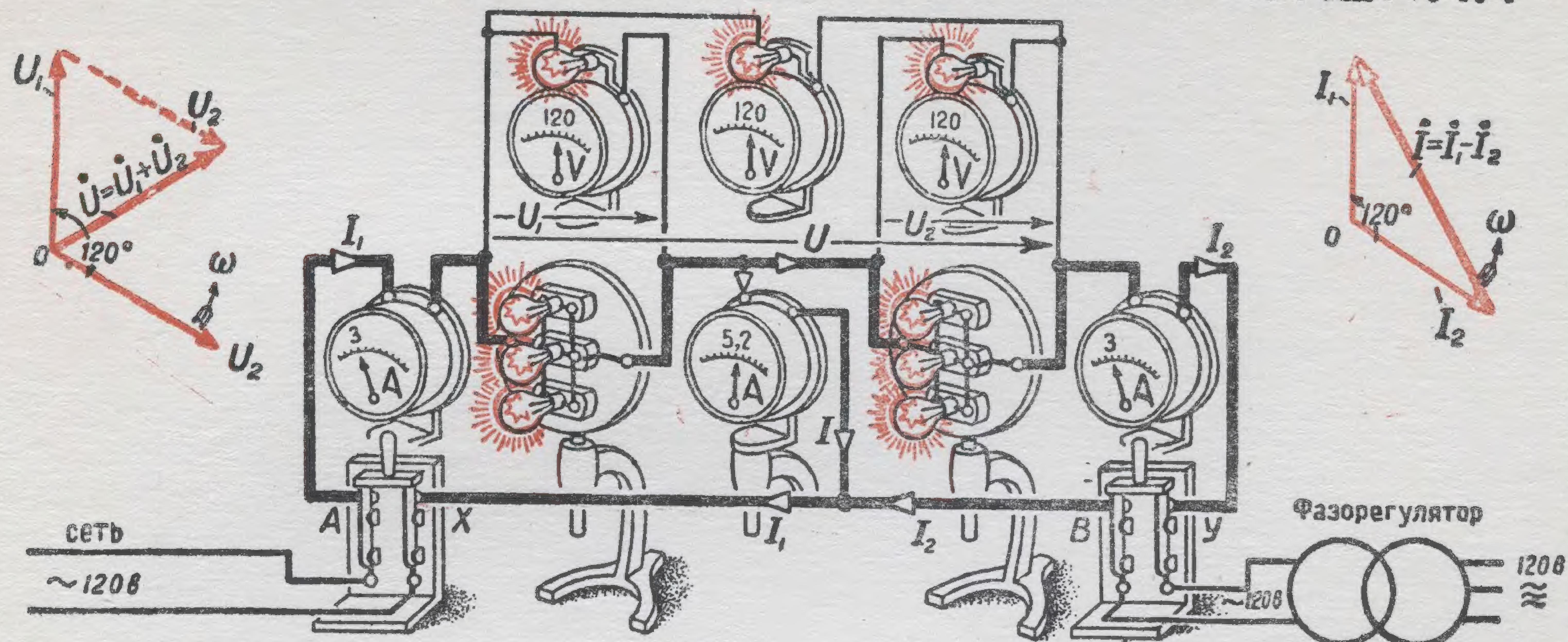
СРЕДНИМ значением переменного тока называется величина эквивалентного постоянного тока, при котором за полпериода, начиная с нуля, по цепи протекает такое же количество электричества, что и при рассматриваемом переменном токе.

Среднее значение переменного тока за целый период равно нулю

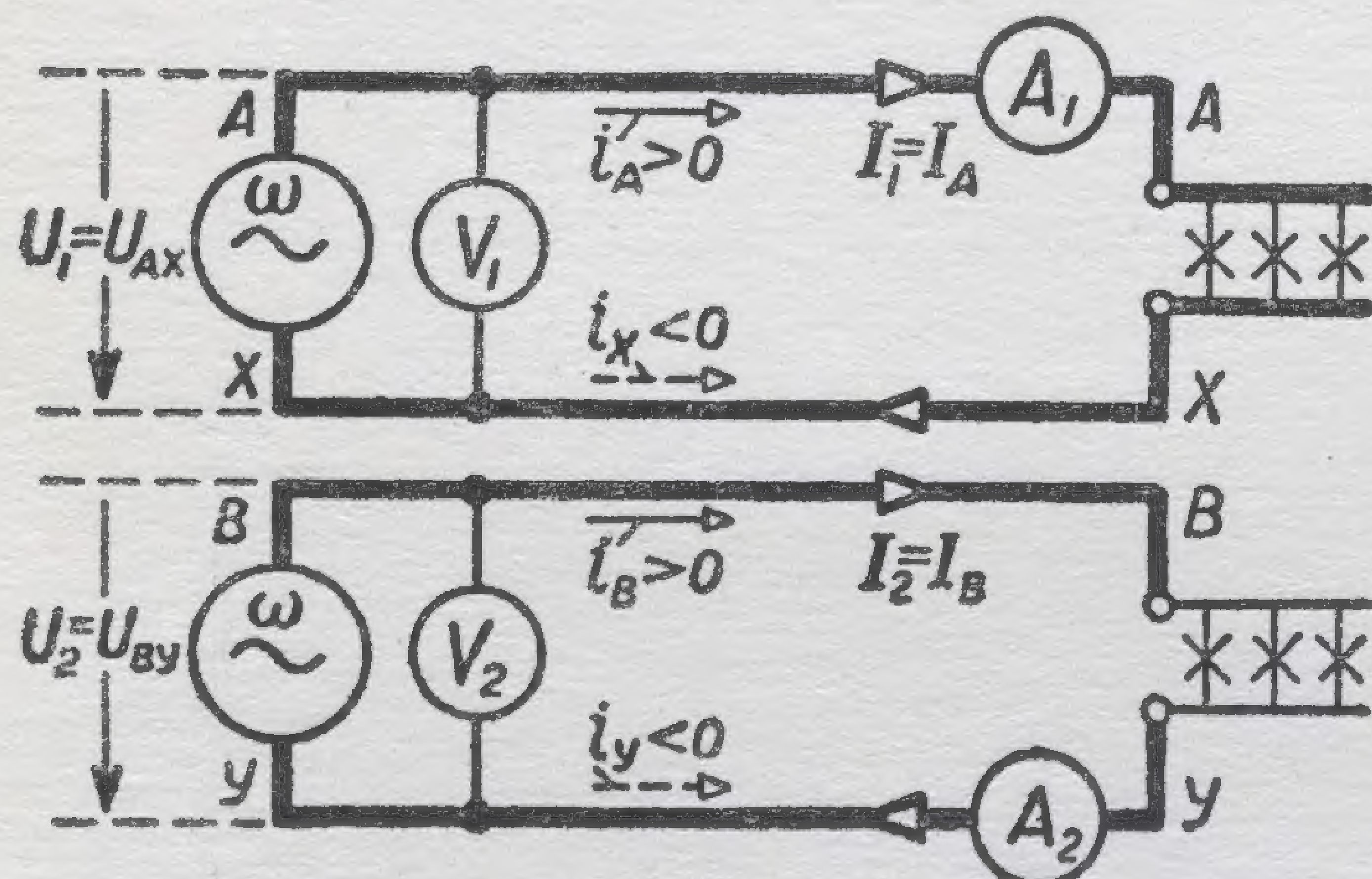
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

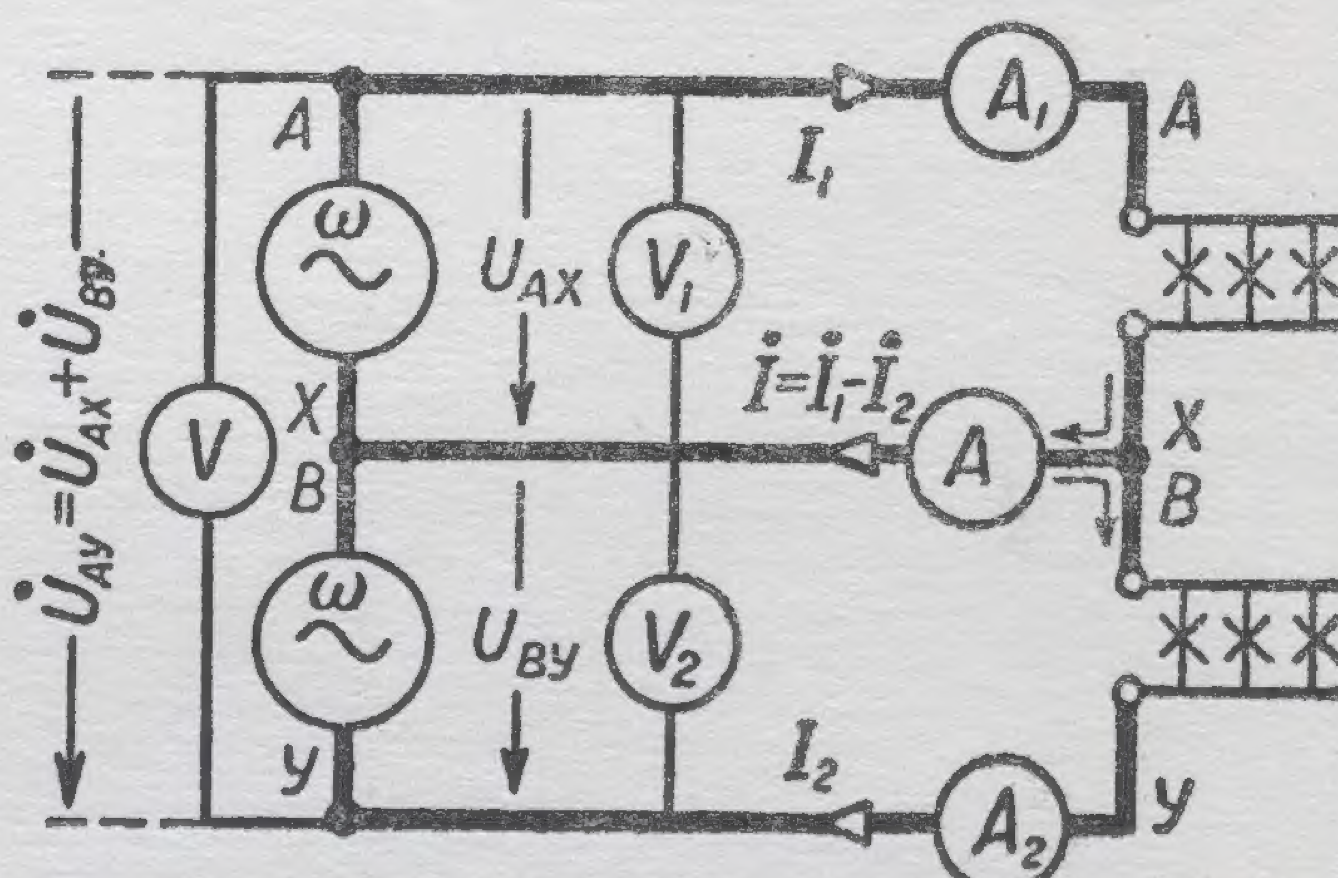
СЛОЖЕНИЕ И ВЫЧИТАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ ИЛИ НАПРЯЖЕНИЙ



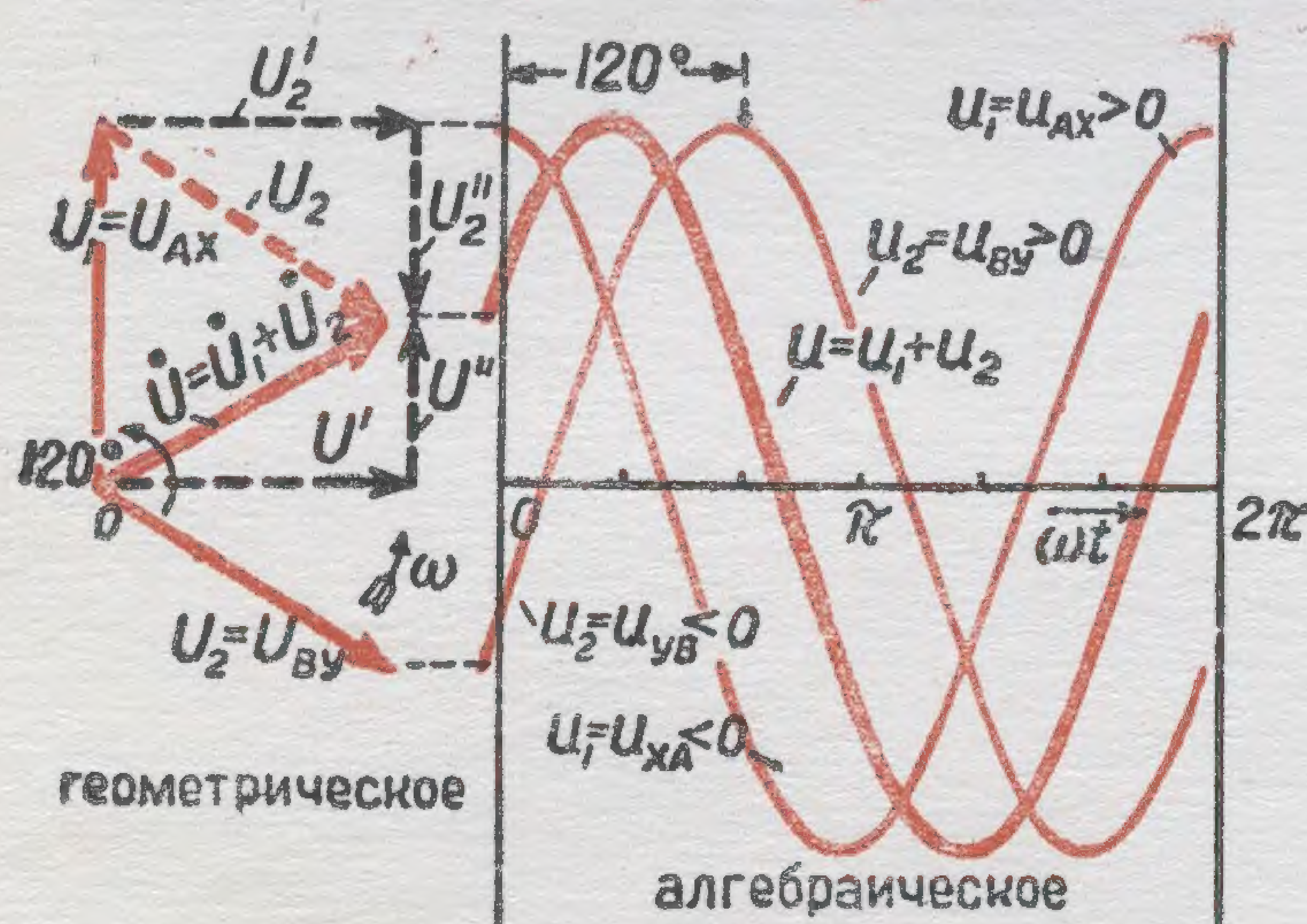
Сложение напряжений и вычитание токов, сдвинутых по фазе на 120°



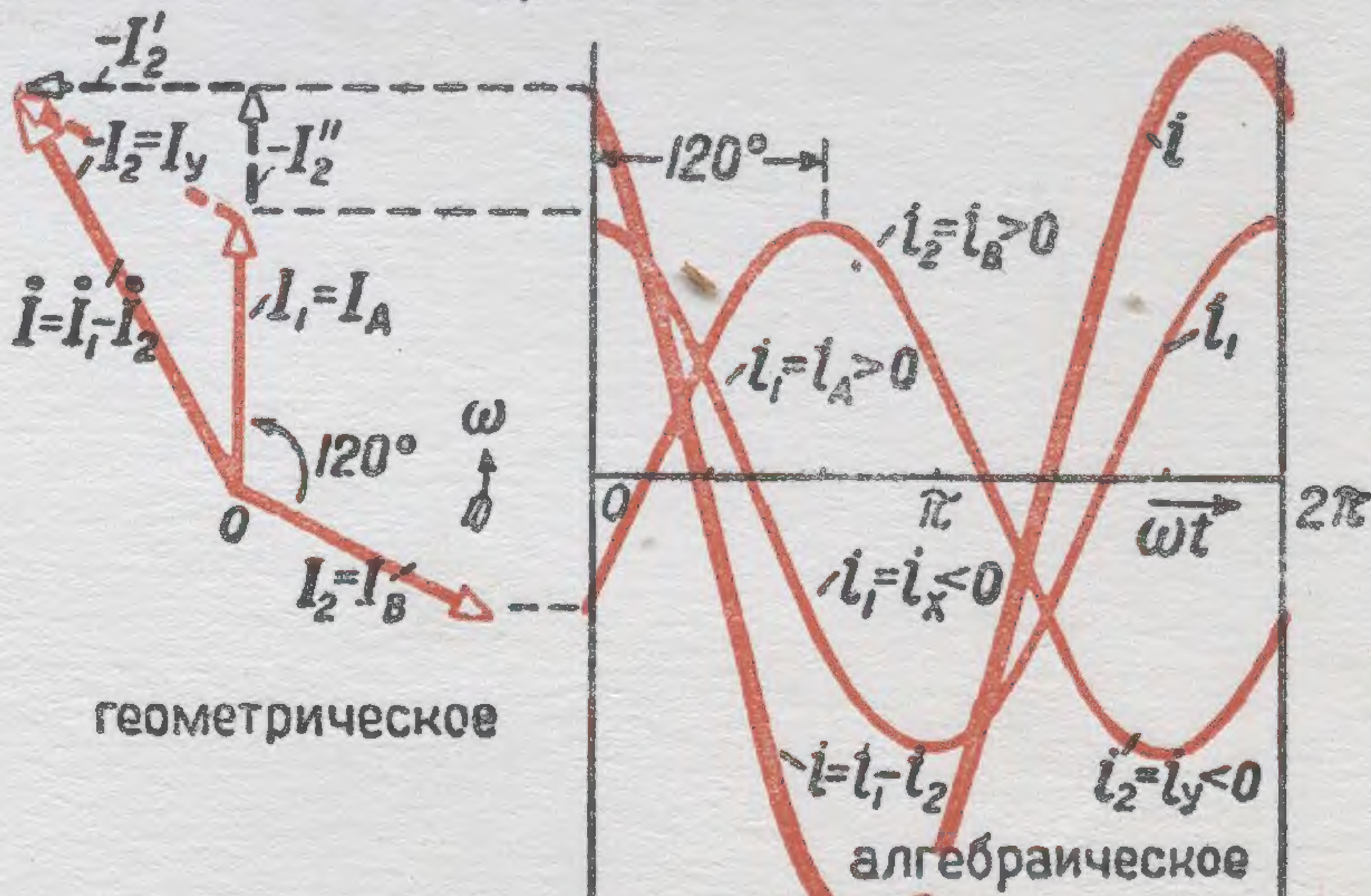
Напряжения и токи двух не связанных цепей



Сложение напряжений и вычитание токов



Сложение напряжений, сдвинутых на 120°



Вычитание токов сдвинутых на 120°

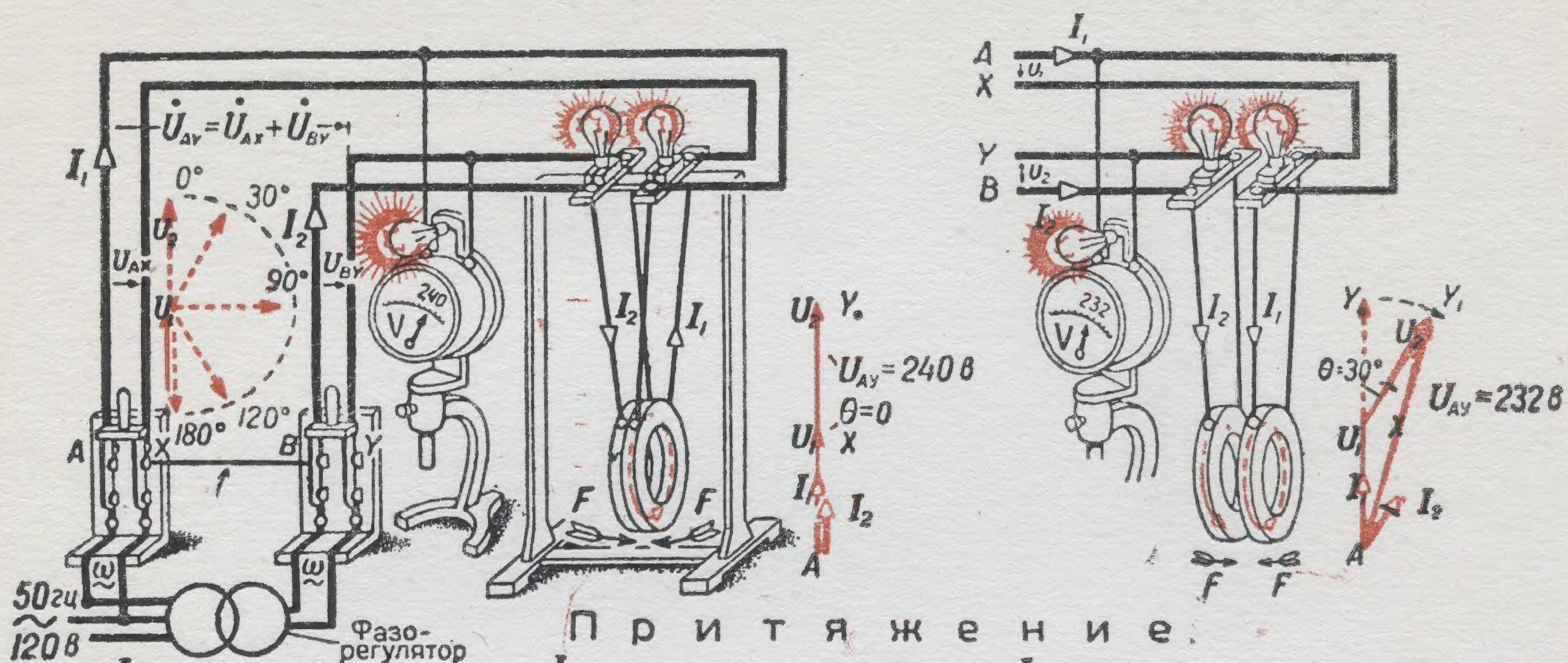
При сложении и вычитании переменных токов или напряжений одинаковой частоты необходимо задаться: их положительным направлением в цепи, величиной и фазой

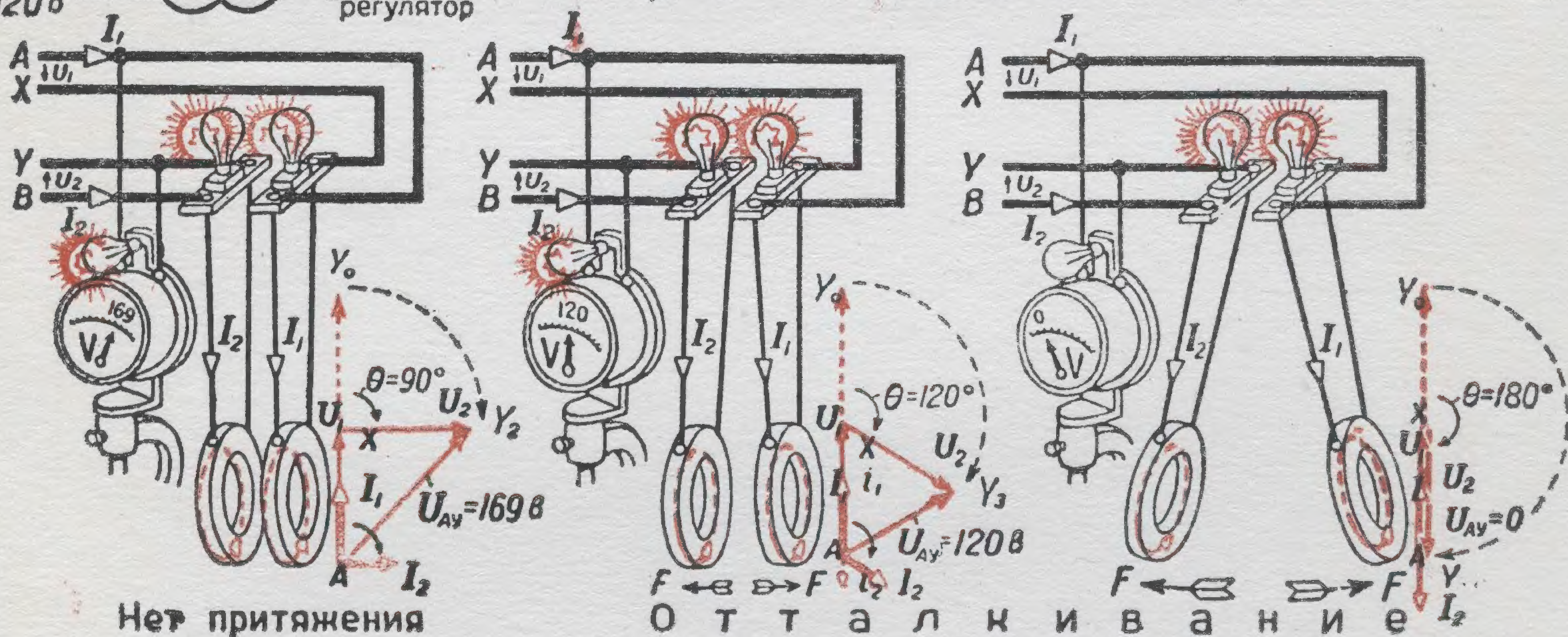
Мгновенные значения (u,i) складываются Алгебраически, действующие значения (U,I) — геометрически

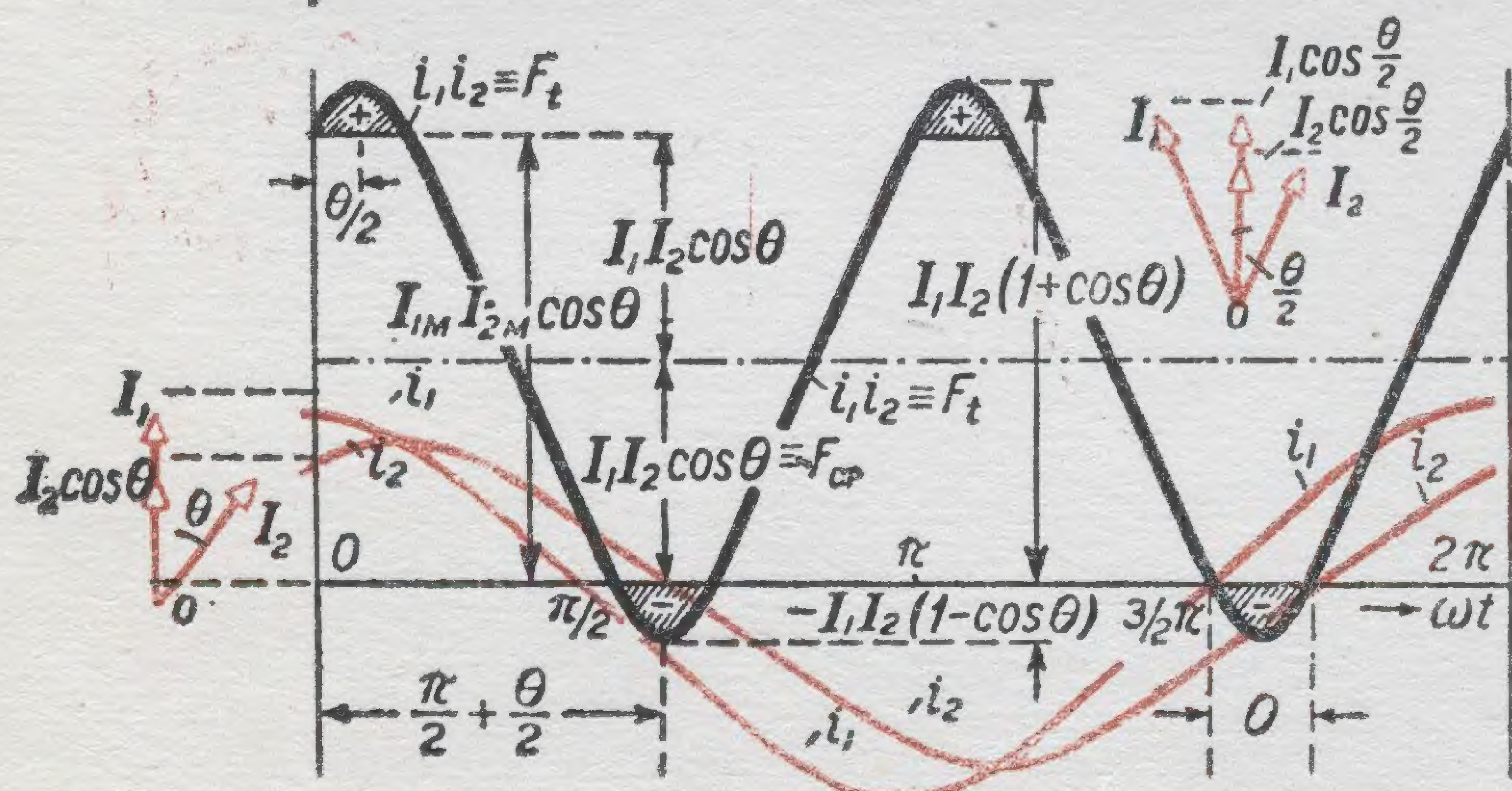
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ







$$I_{1M}\cos\frac{\theta}{2} \cdot I_{2M}\cos\frac{\theta}{2} = I_1 I_2 (1+\cos\theta)$$

$I_2 \sin\frac{\theta}{2}$, $\frac{\pi}{2}+\frac{\theta}{2}$, $-I_1 \sin\frac{\theta}{2}$

$$I_{1M}\sin\frac{\theta}{2} \cdot I_{2M}\sin\frac{\theta}{2} = I_1 I_2 (1-\cos\theta)$$

Среднее значение силы взаимодействия

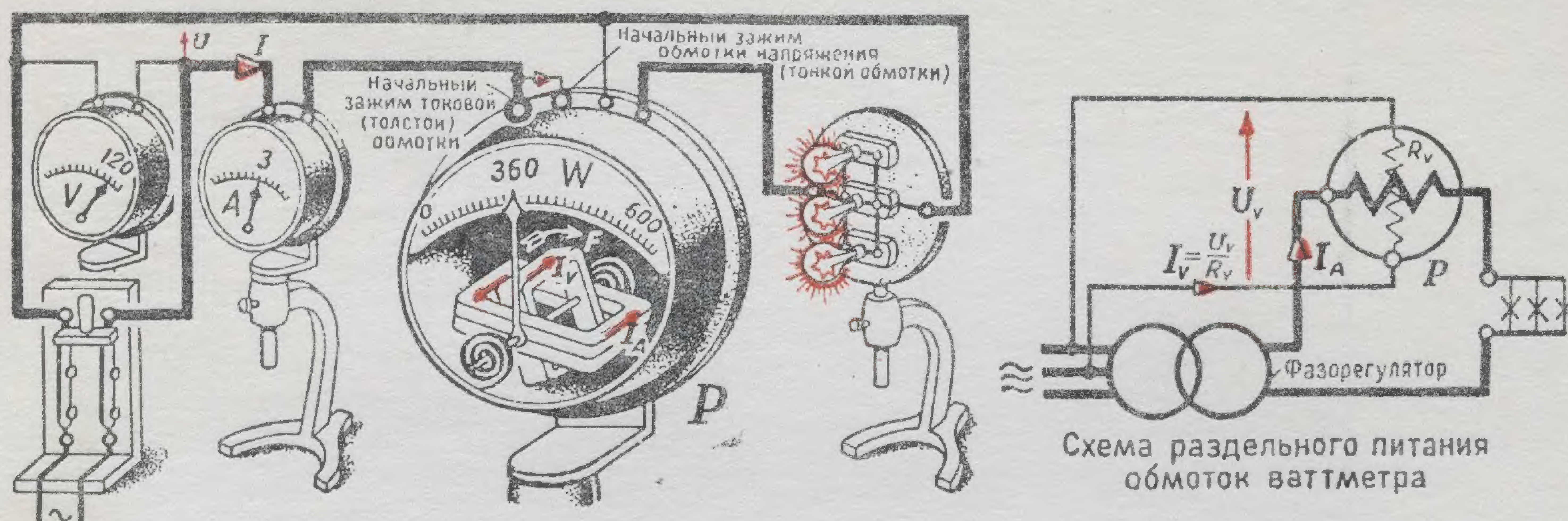
$$F_{cp} \equiv I_1 I_2 \cos\Theta \; \frac{дж}{м}$$

Среднее значение силы взаимодействия двух переменных токов пропорционально произведению действующих значений этих токов и косинуса угла сдвига фаз между ними

Э. И. Расовский

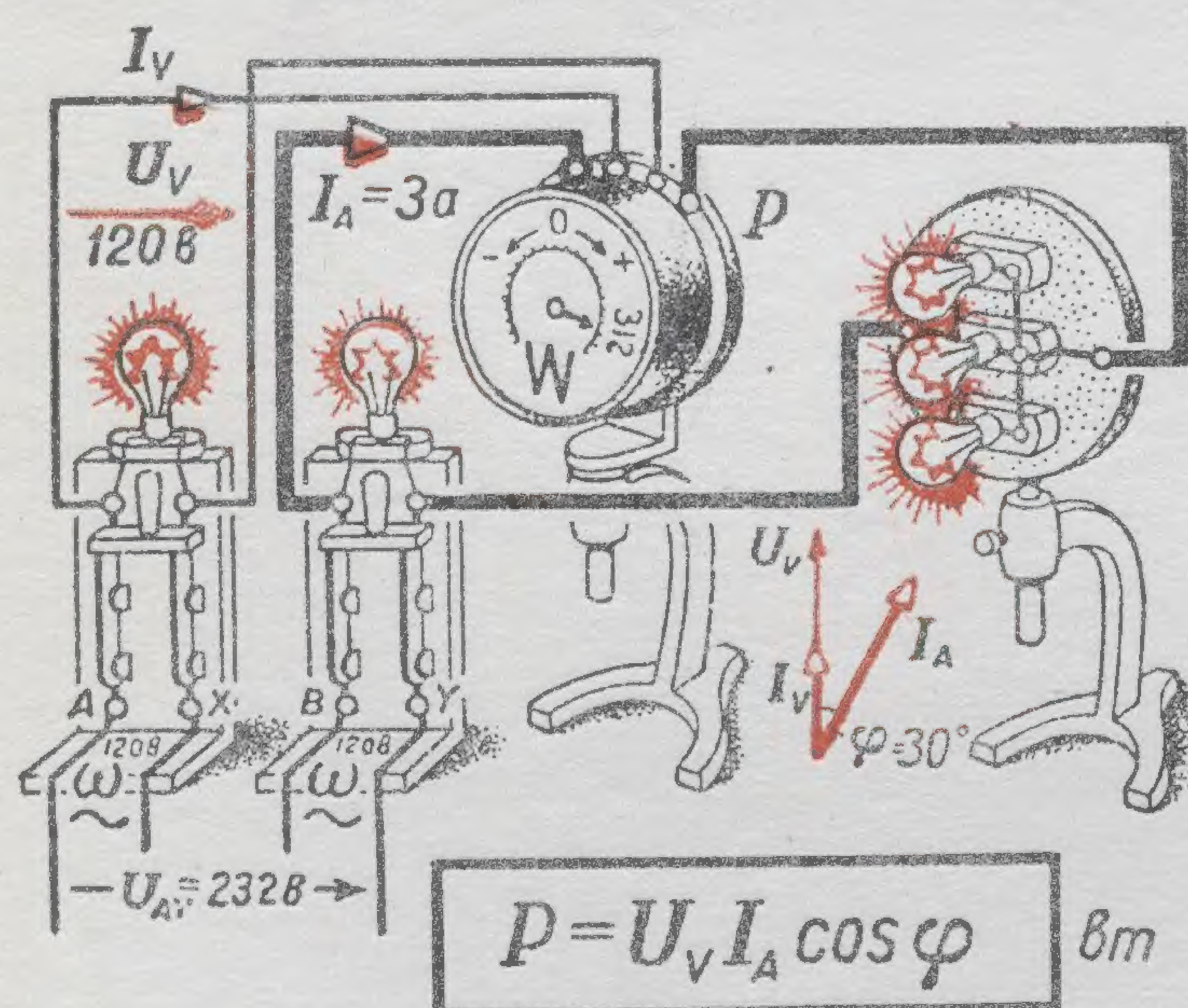
Худ. А. Меньшиков

ВАТТМЕТР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



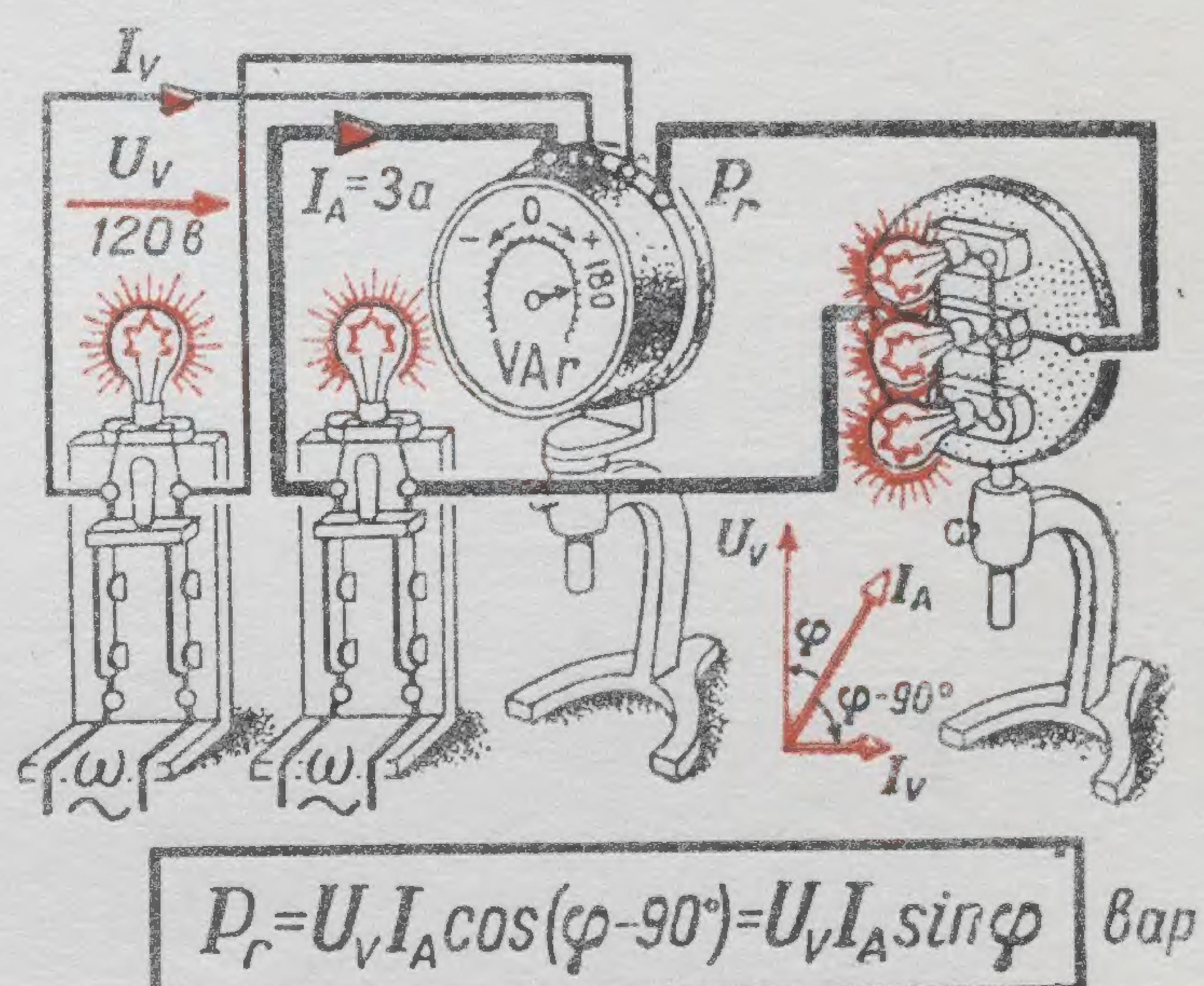
Взаимодействие обмоток электродинамического ваттметра

Схема раздельного питания обмоток ваттметра



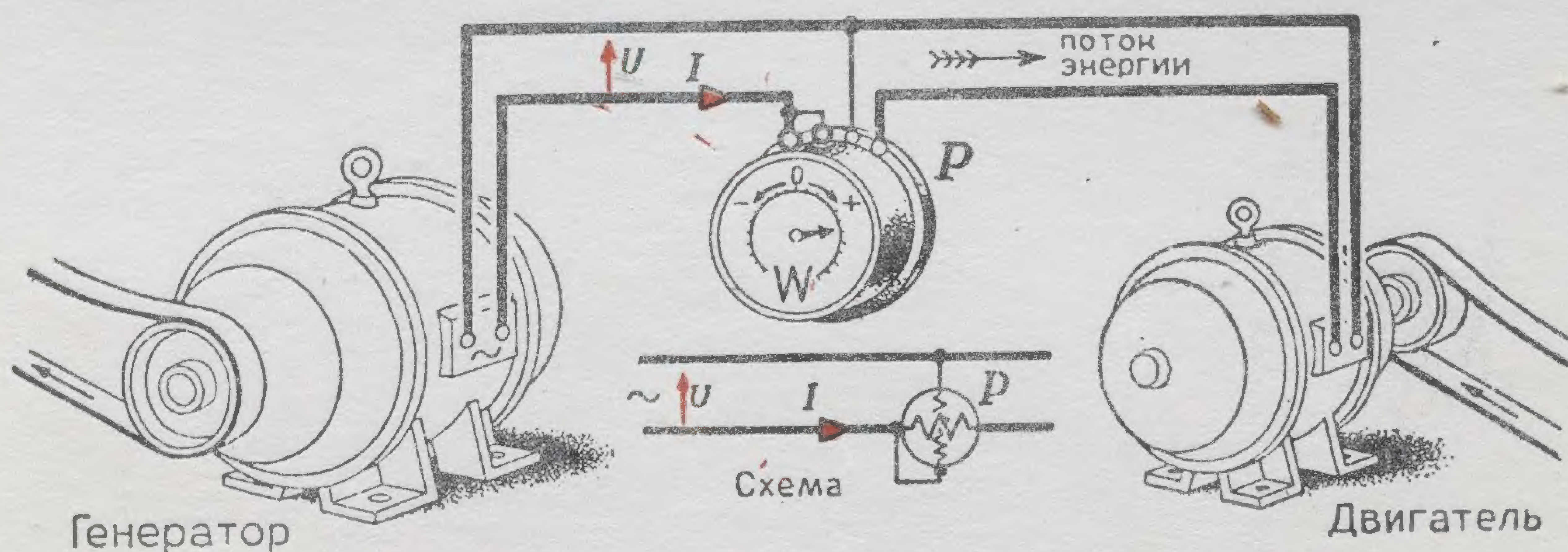
$$P = U_V I_A \cos\varphi \quad вт$$

Раздельное питание обмоток ваттметра при искусственно созданном сдвиге фаз в 30° между токами в толстой и тонкой обмотках.



$$P_r = U_V I_A \cos(\varphi - 90°) = U_V I_A \sin\varphi \quad вар$$

Раздельное питание обмоток реактивного, синусного, ваттметра (со специальным сдвигом фаз в 90° в цепи его тонкой обмотки).



Включение ваттметра в цепь переменного тока.

$$P = UI\cos\varphi \quad вт$$

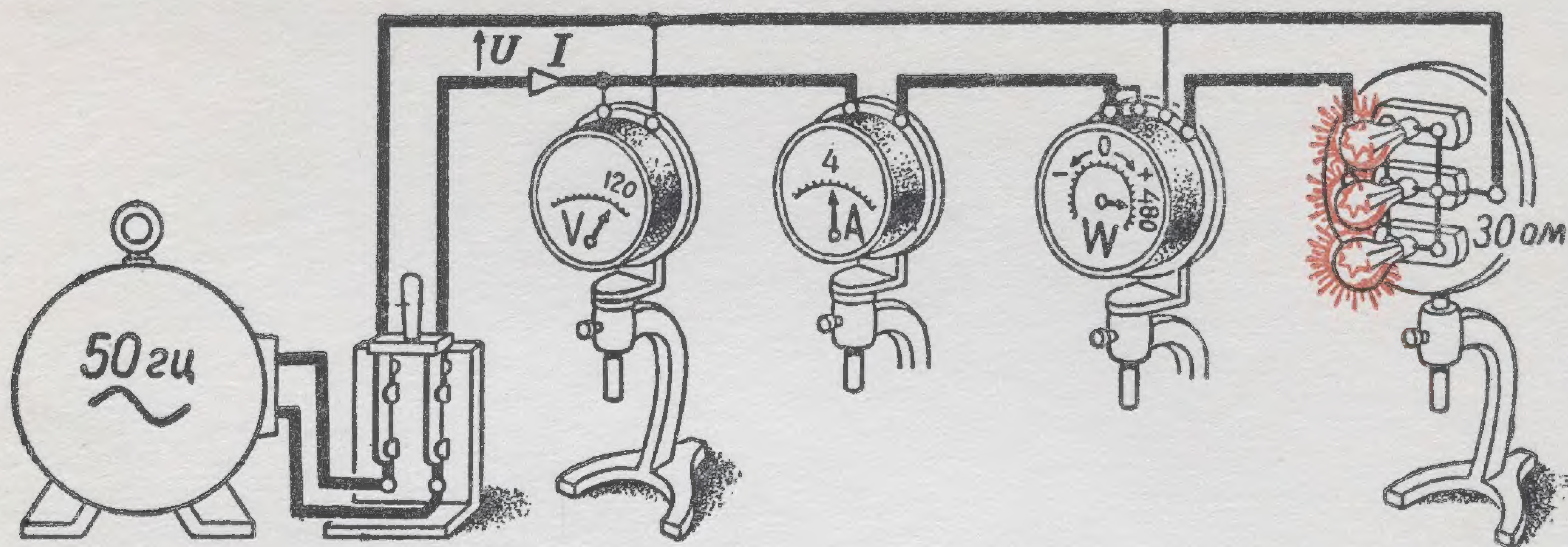
Показание ваттметра

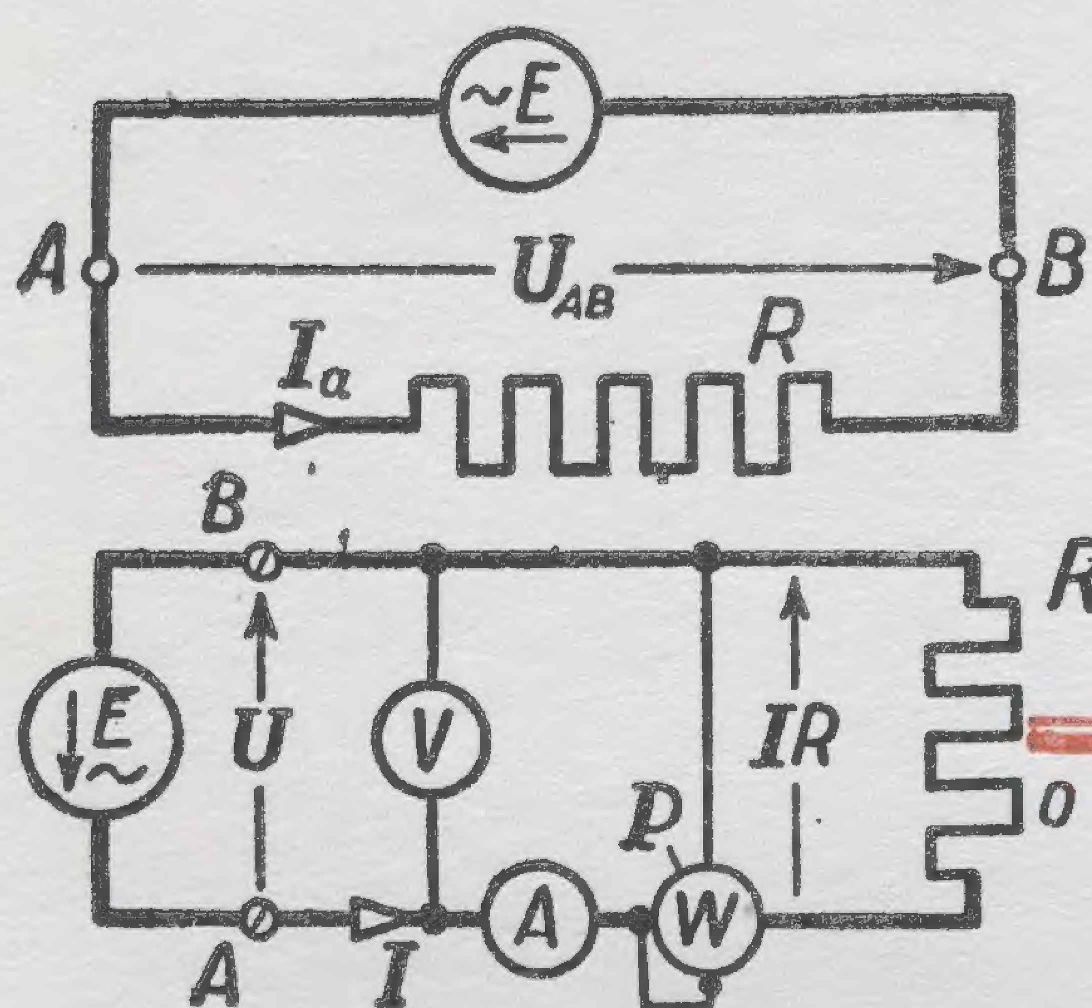
Показание ваттметра равно произведению напряжения, приложенного к зажимам тонкой обмотки, на ток в толстой обмотке и на косинус угла сдвига фаз между ними.

Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ







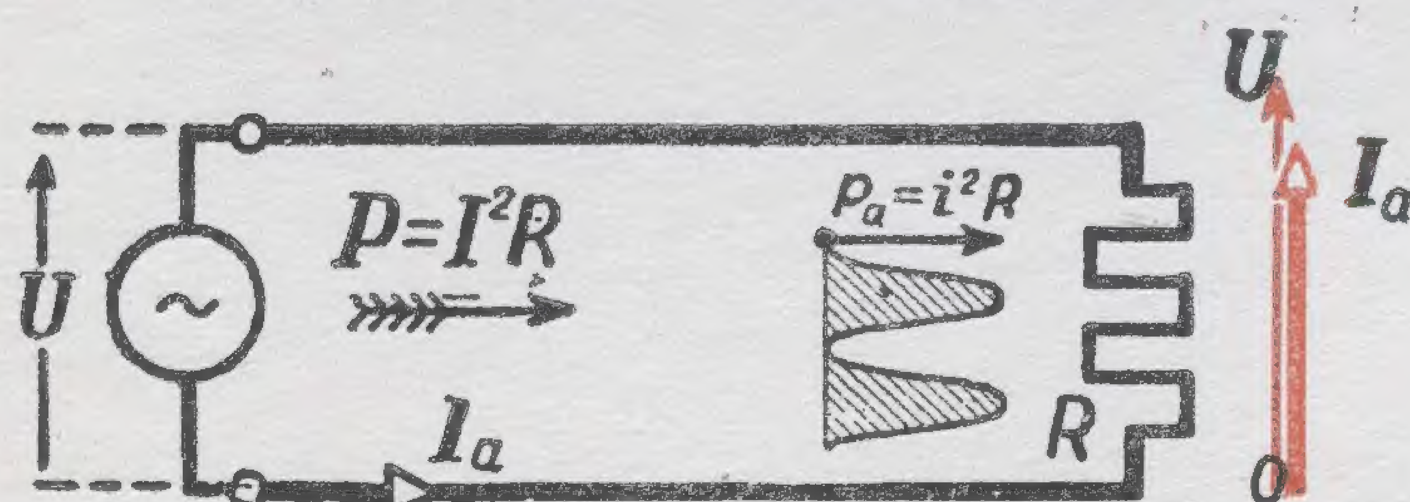
Ток в активном сопротивлении совпадает по фазе с напряжением

$$R=\frac{U}{I_a}=\frac{P}{I^2}\ ом$$

Активное сопротивление

$$g=\frac{1}{R}=\frac{I_a}{U}=\frac{P}{U^2}\ \frac{1}{ом}$$

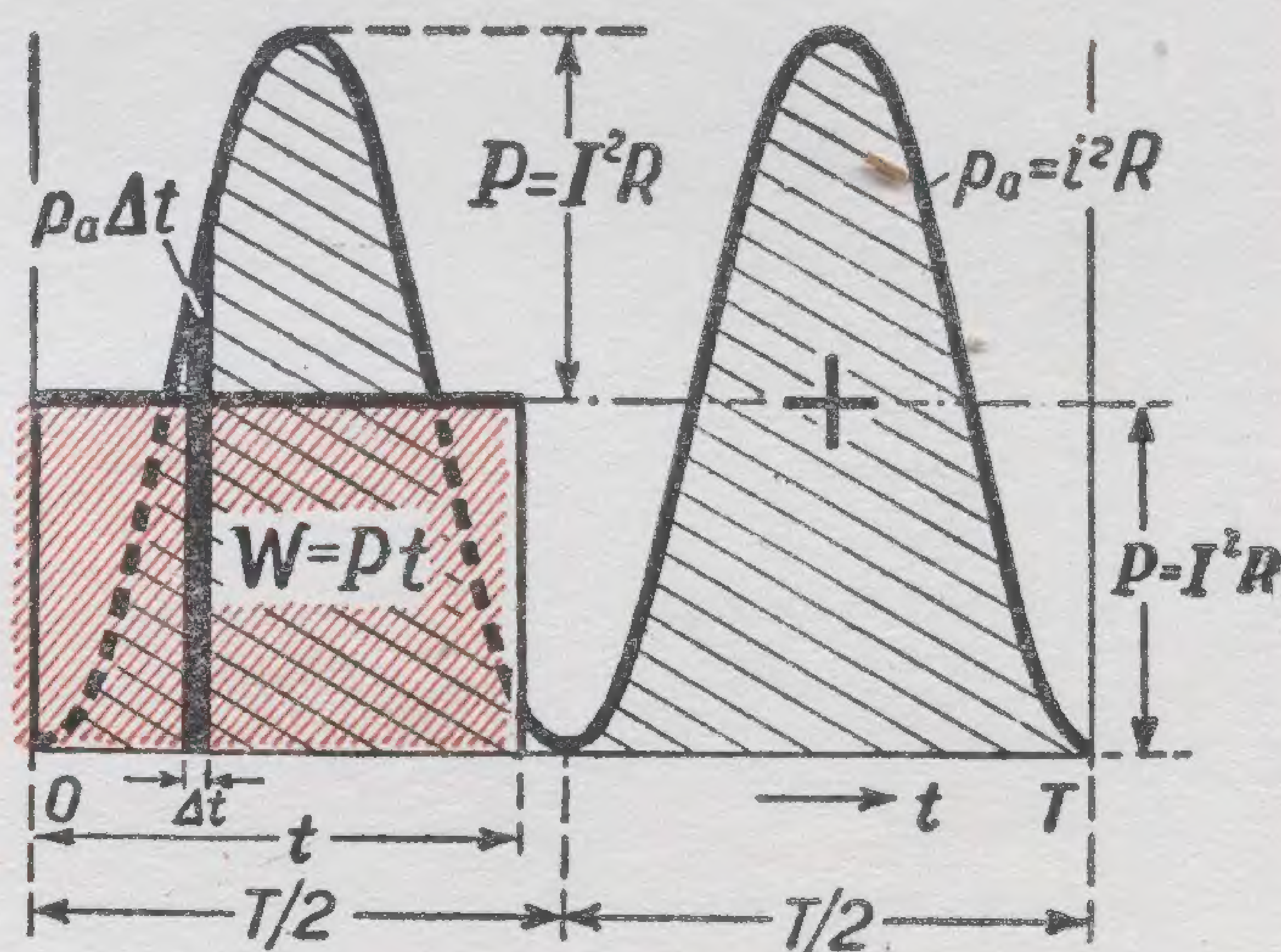
Активная проводимость



Активное сопротивление — приемник активной мощности и активной энергии („приемник" активного тока)



Гидравлическая аналогия



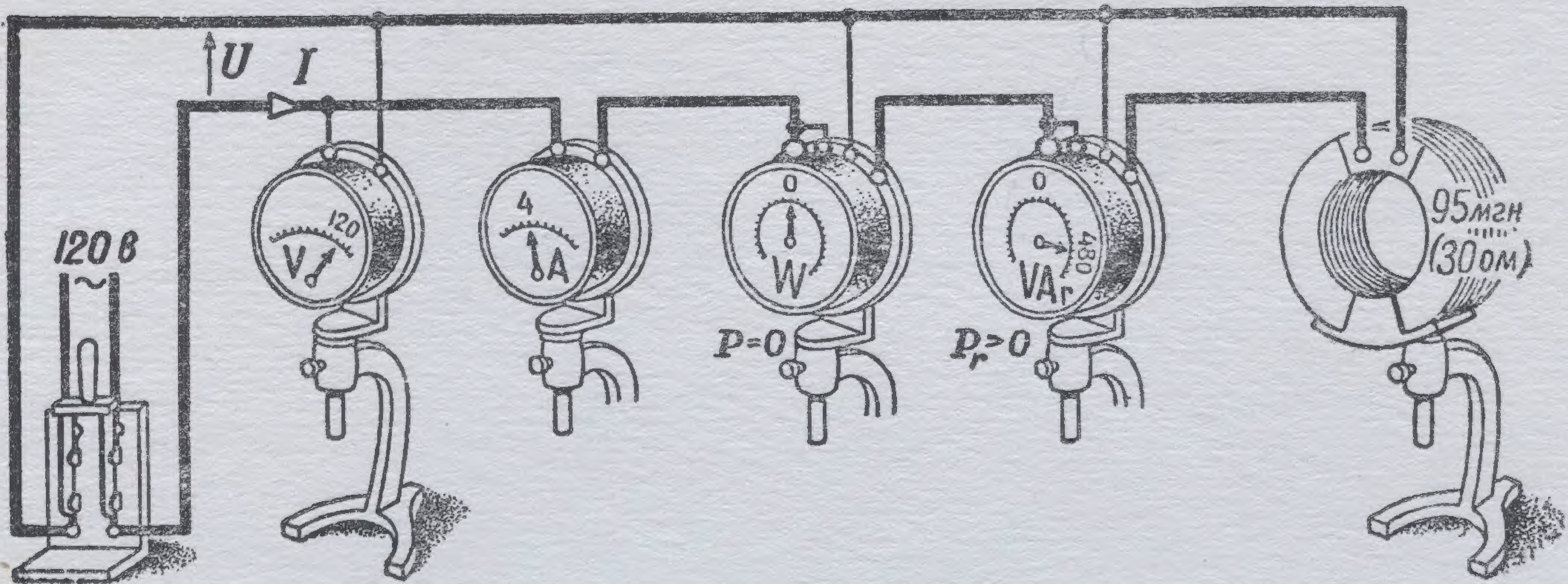
$$P=\frac{1}{T}\sum_0^T i^2R\cdot\Delta t=I^2R=U^2g=UI_a\ вт$$

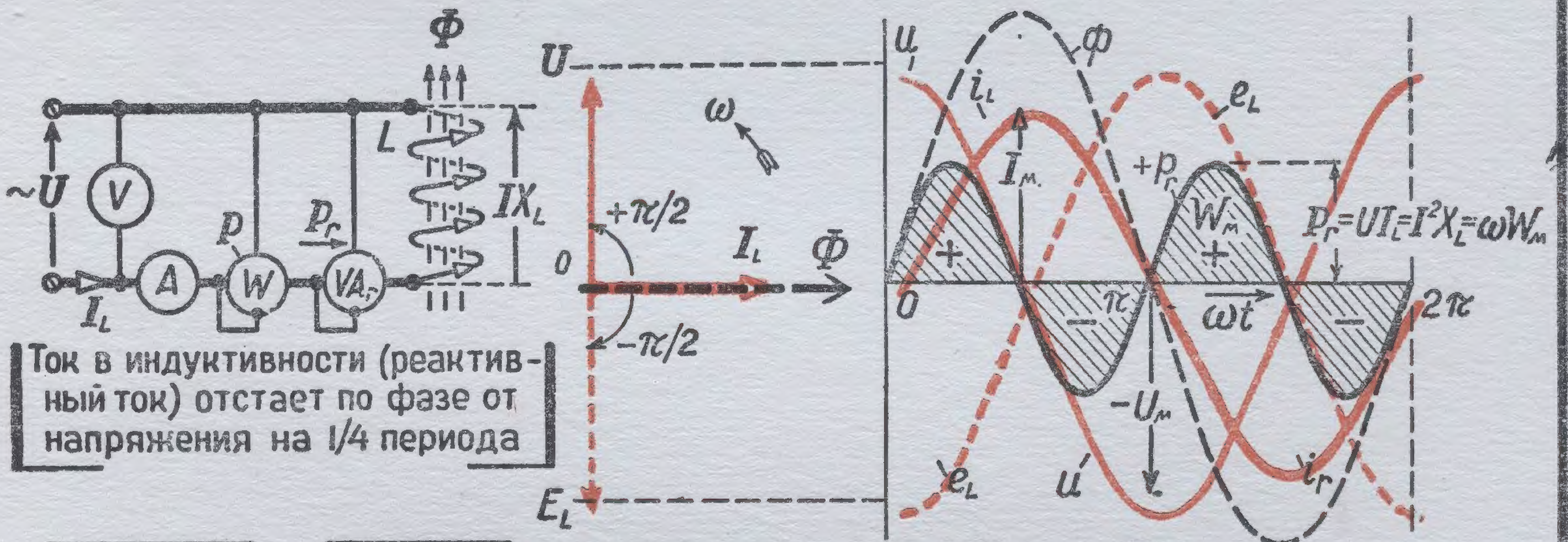
Активная мощность есть среднее значение мгновенной мощности за период (показание ваттметра)

Э.И. Расовский

Худ. А Меньшиков

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОСТЬЮ



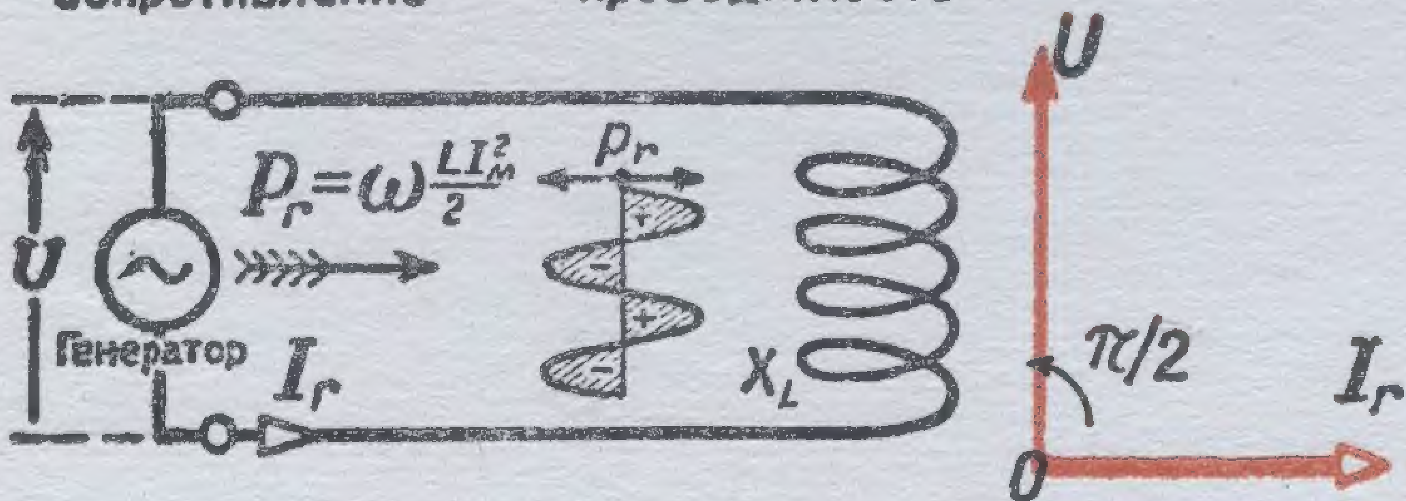


Ток в индуктивности (реактивный ток) отстает по фазе от напряжения на 1/4 периода

$X_L = \omega L = \frac{U}{I_r}$ ом — Индуктивное сопротивление

$b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{I_r}{U}$ $\frac{1}{ОМ}$ — Индуктивная проводимость

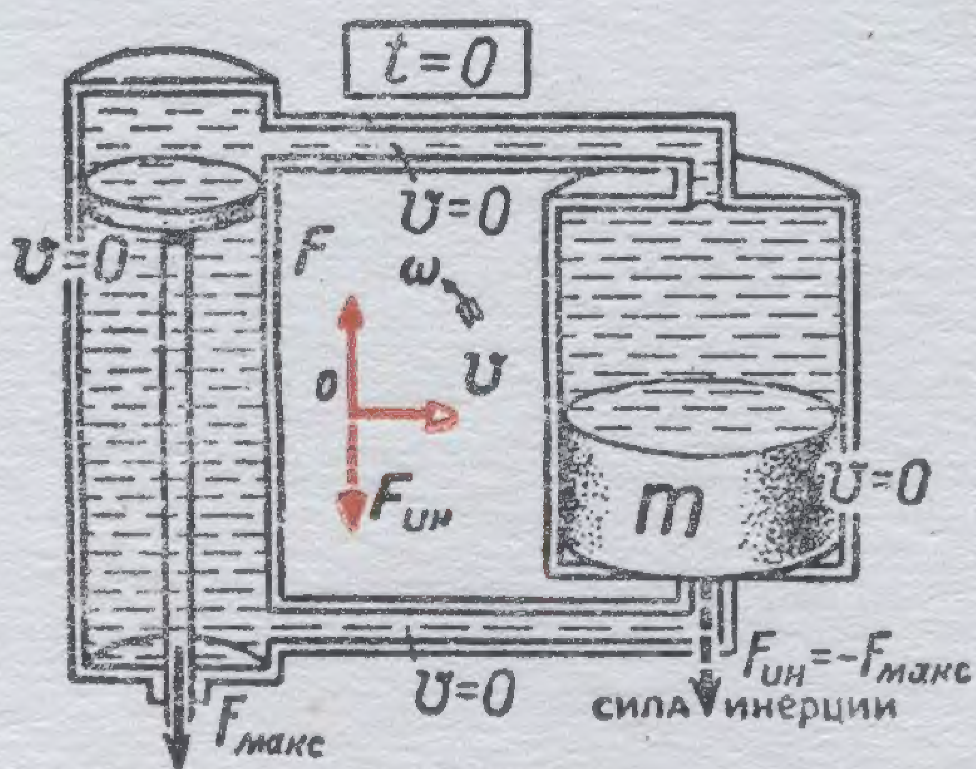
Из-за инерции переменный ток в индуктивности не поспевает за изменениями напряжения



$$P_r = UI_r = U^2 b_L = I^2 X_L = I^2 \omega L = \omega \frac{LI_m^2}{2} = \omega W_m \text{ вар}$$

Реактивная мощность – мера колеблющейся в цепи энергии (показание реактивного ваттметра)

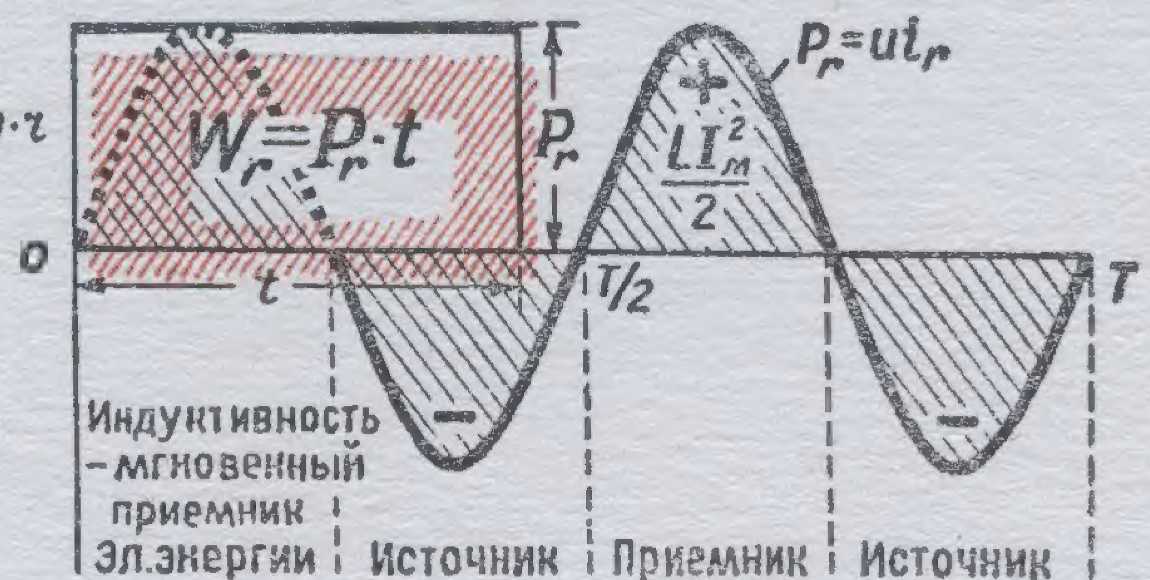
Индуктивность – условный приемник реактивной мощности и реактивной энергии („приемник" реактивного, отстающего, тока)



Гидравлическая аналогия

$W_r = P_r \cdot t = \omega \frac{LI_m^2}{2} t$ вар·ч

Реактивная энергия, „потребляемая" индуктивностью

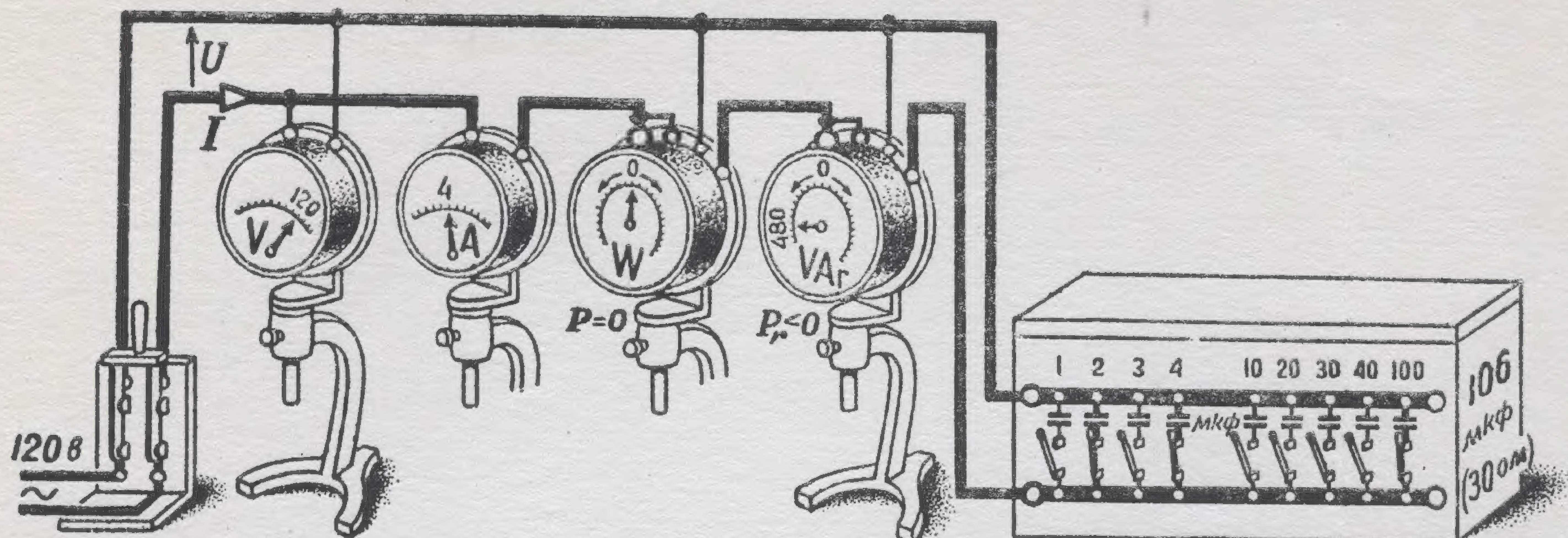


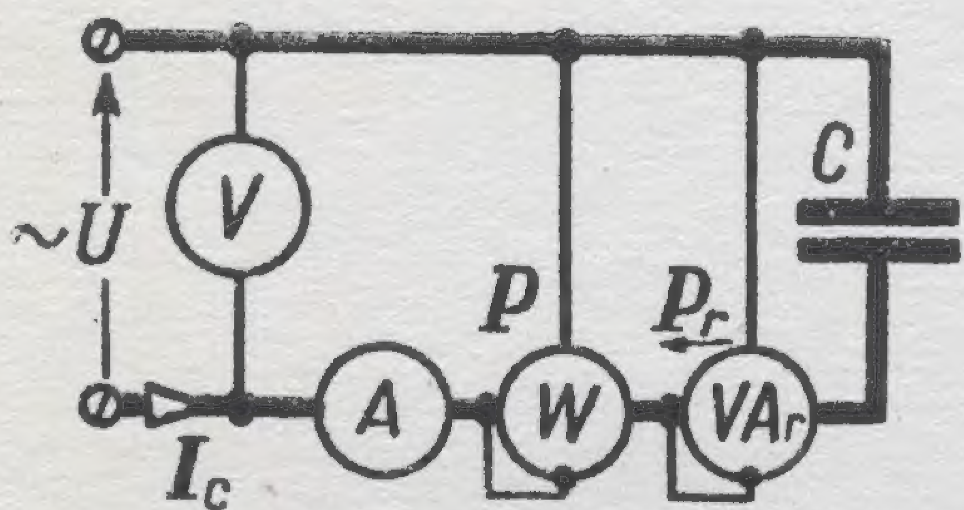
Колебание энергии в цепи

Э.И. Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ



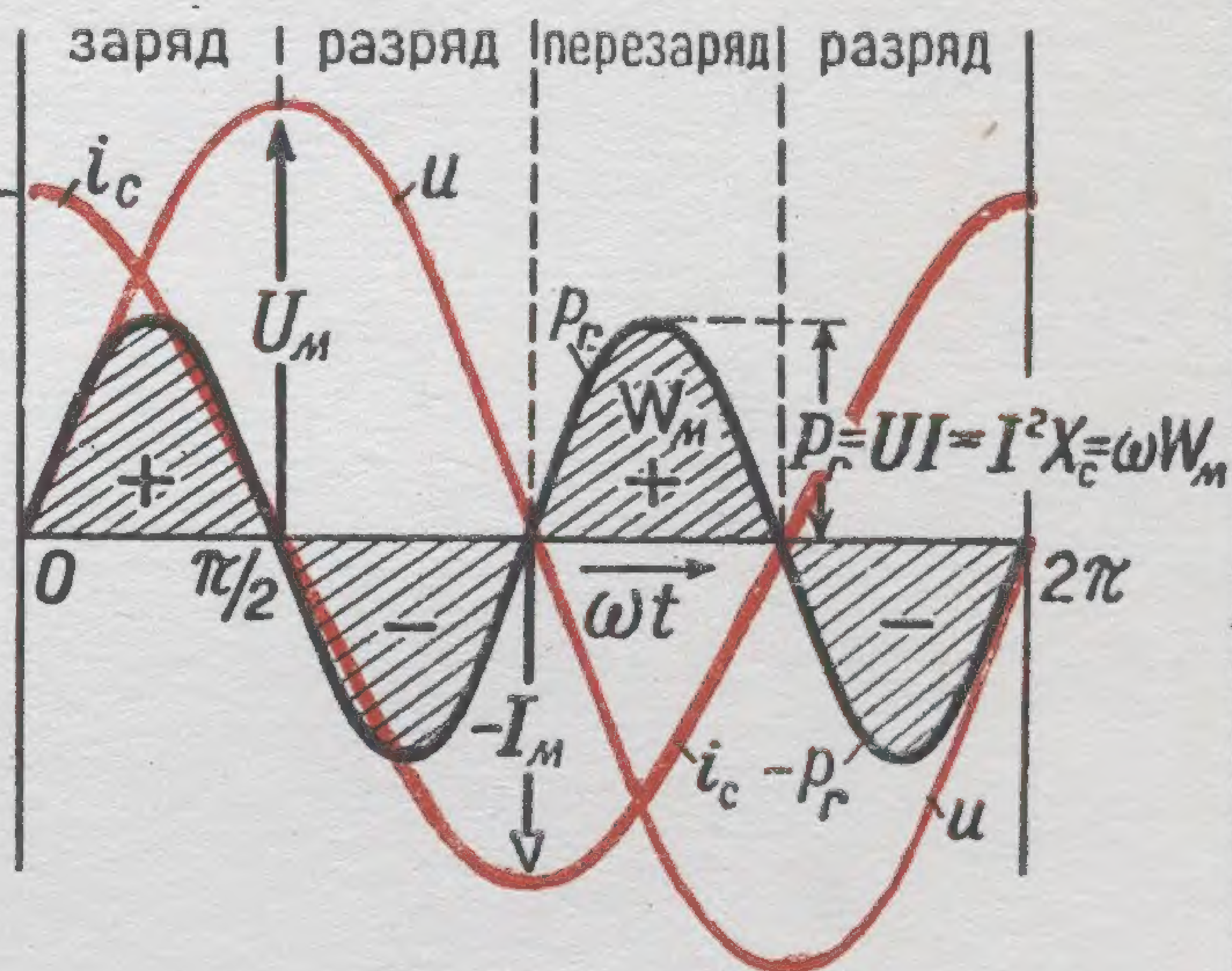


I_c ω

$-\frac{\pi}{2}$ U

0

Емкостный ток опережает напряжение по фазе на 1/4 периода



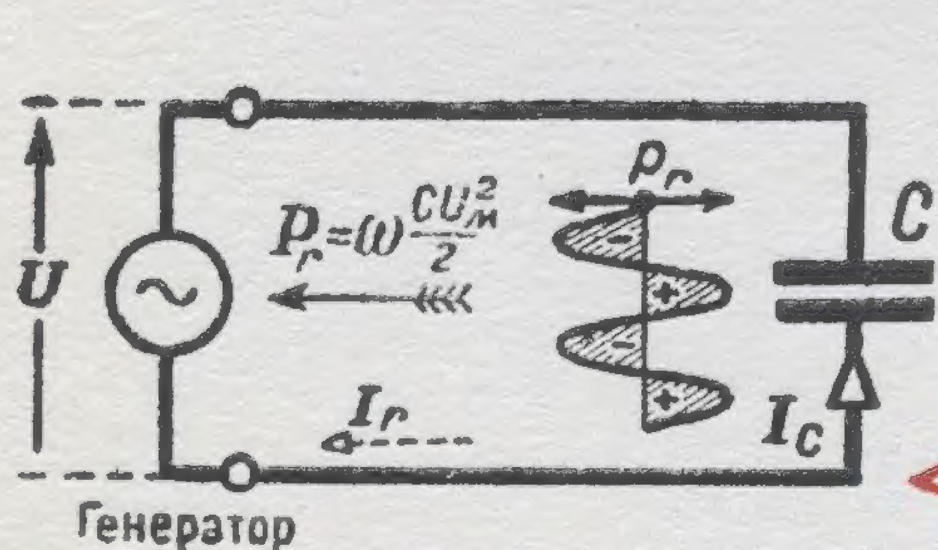
$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{I_c}$ ом

Емкостное сопротивление

$b_c = \frac{1}{X_c} = \omega C = \frac{I_c}{U}$ $\frac{1}{ом}$

Емкостная проводимость.

Зарядный ток конденсатора зависит от скорости нарастания напряжения



U

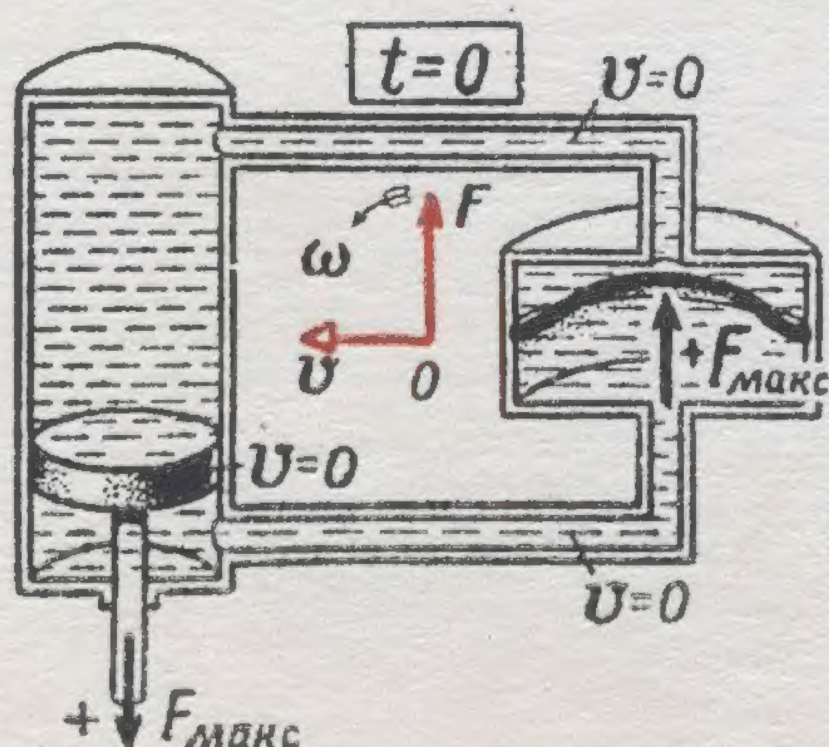
$-\frac{\pi}{2}$ $\frac{\pi}{2}$

I_c 0 I_r

$P_r = UI_c = I^2X_c = U^2\omega C = \omega\frac{CU_м^2}{2} = \omega W_{макс}$ вар

Реактивная мощность — мера колеблющейся в цепи энергии (отрицательное показание реактивного ваттметра)

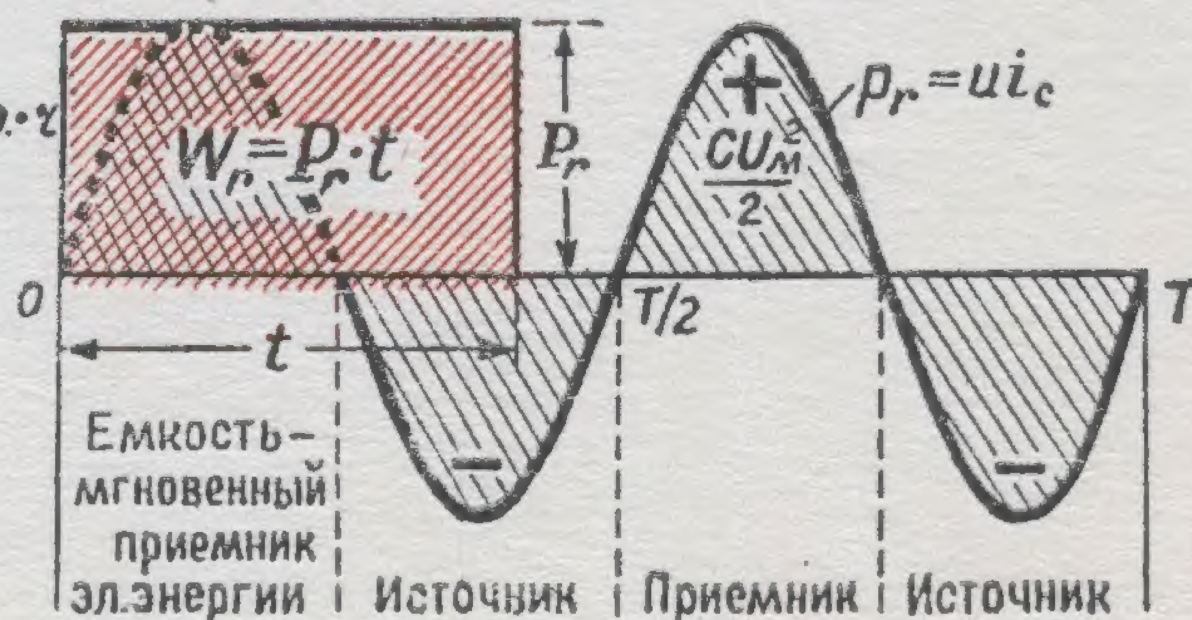
Емкость — условный источник реактивной мощности и реактивной энергии („источник" реактивного, отстающего, тока или „приемник" емкостного, опережающего, тока)



Гидравлическая аналогия.

$W_r = P_r \cdot t = \omega\frac{CU_м^2}{2}\cdot t$ вар·ч

Реактивная энергия, „отдаваемая" емкостью

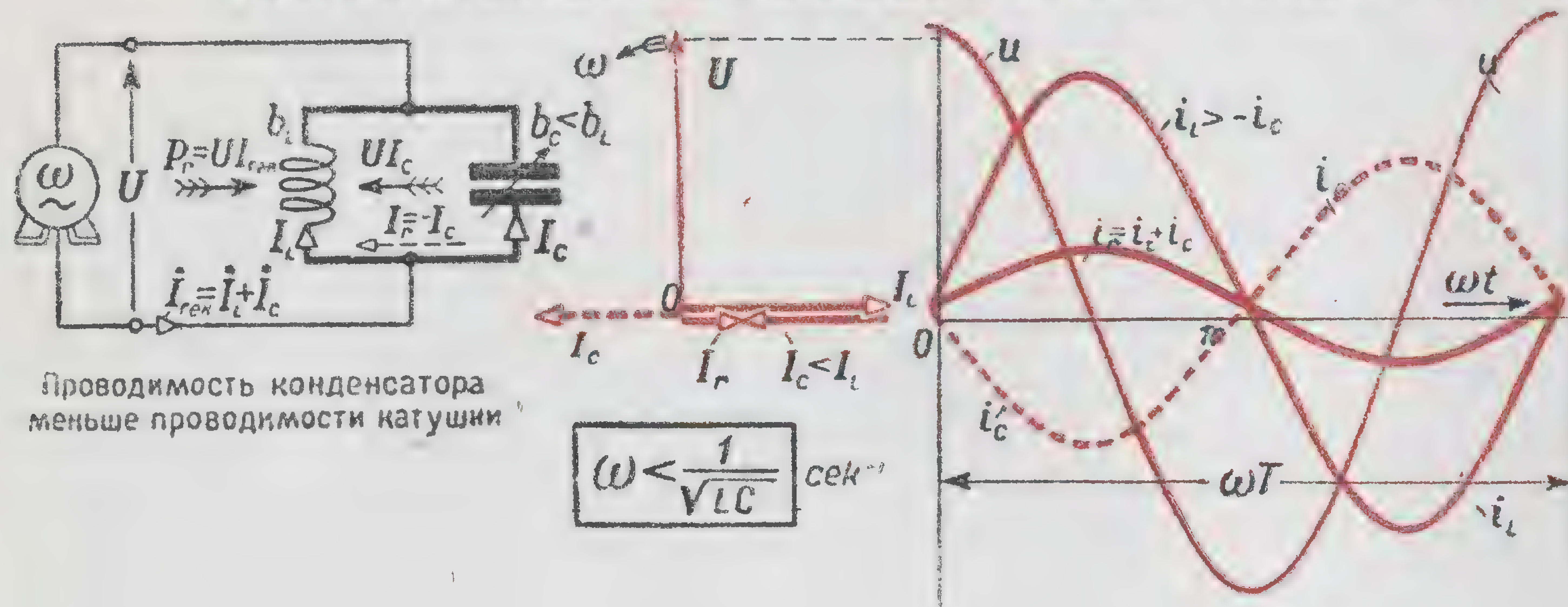


Колебание энергии в цепи

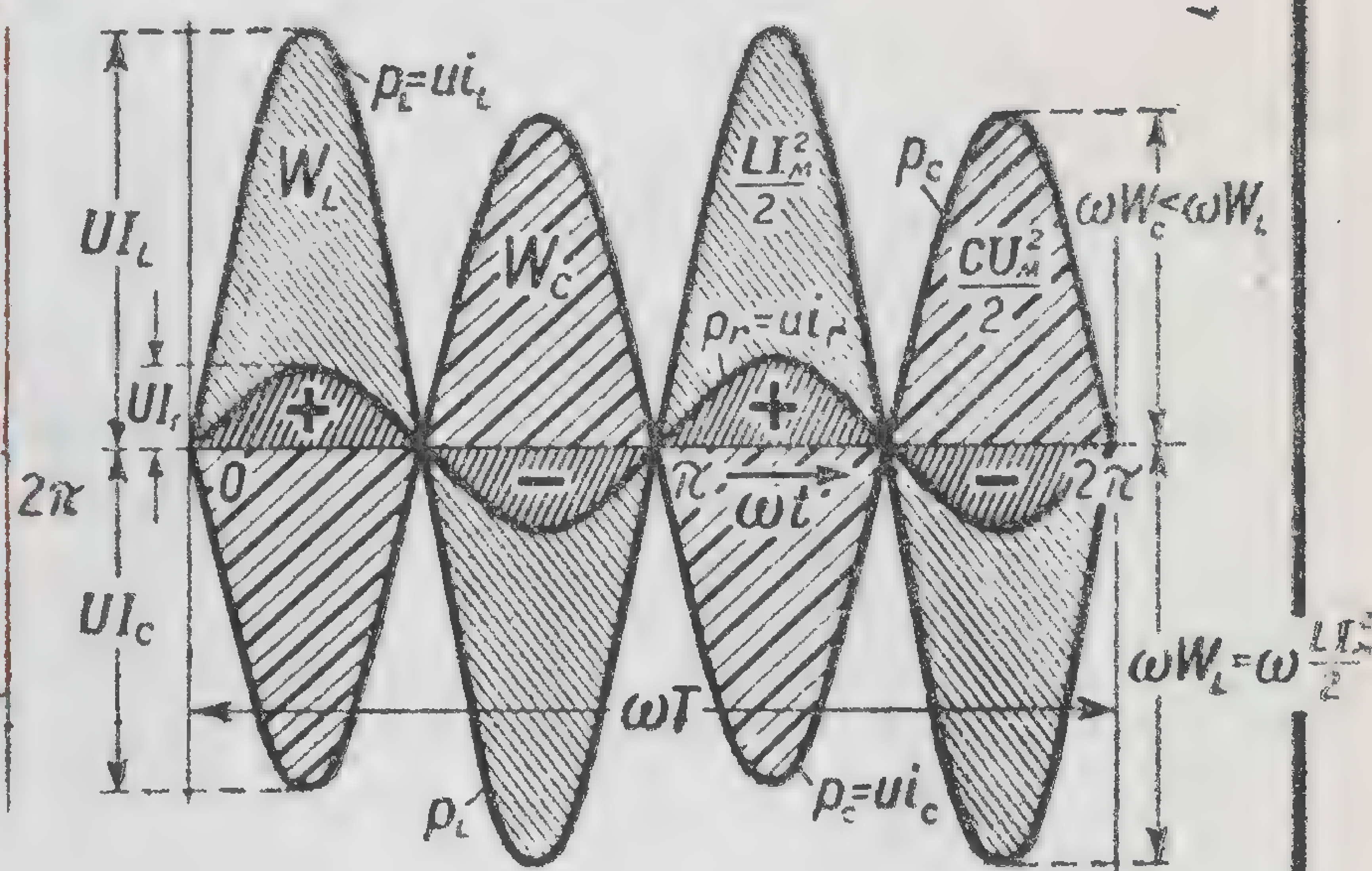
Э.И. Расовский.

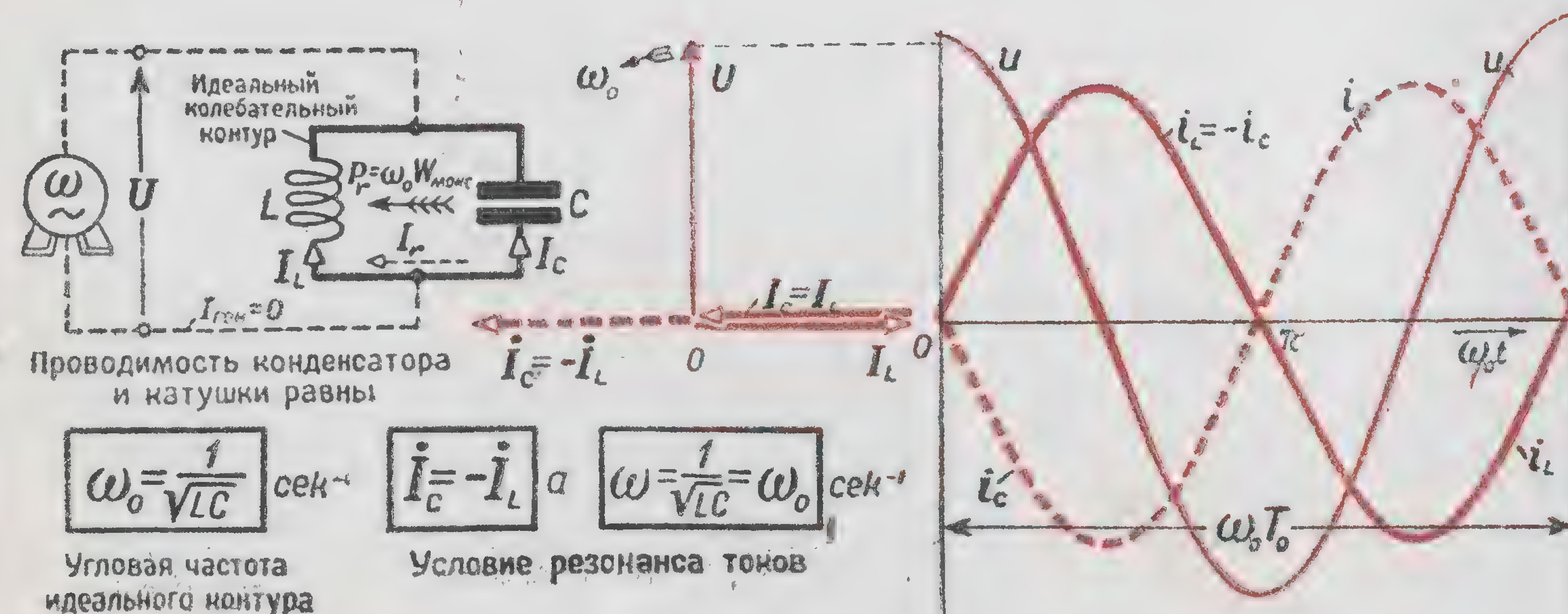
Худ. А. Меньшиков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ



$\omega < \frac{1}{\sqrt{LC}}$ сек$^{-1}$



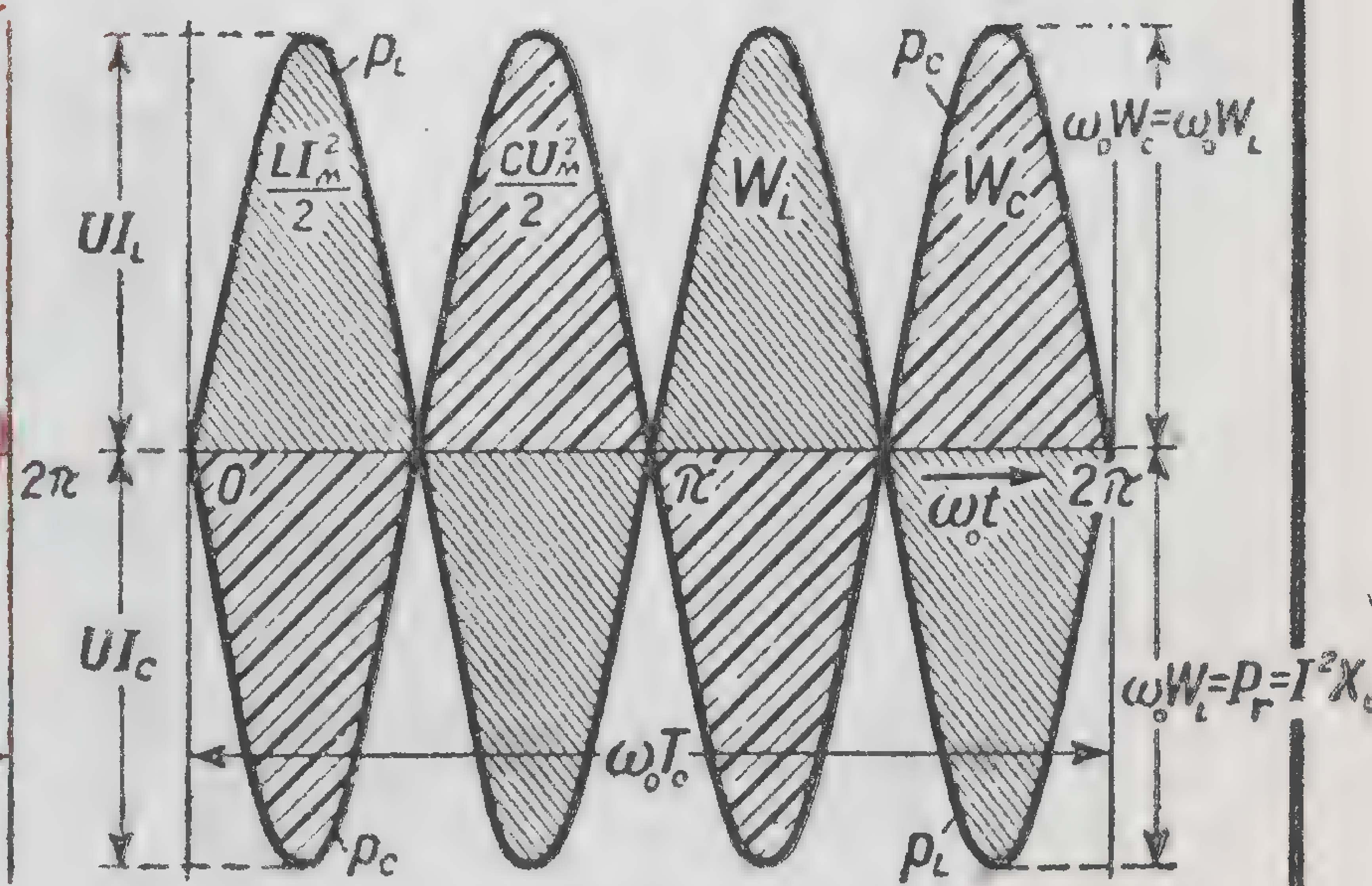


$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ сек$^{-1}$

Угловая частота идеального контура

$\dot{I}_C = -\dot{I}_L$ а $\quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$ сек$^{-1}$

Условие резонанса токов

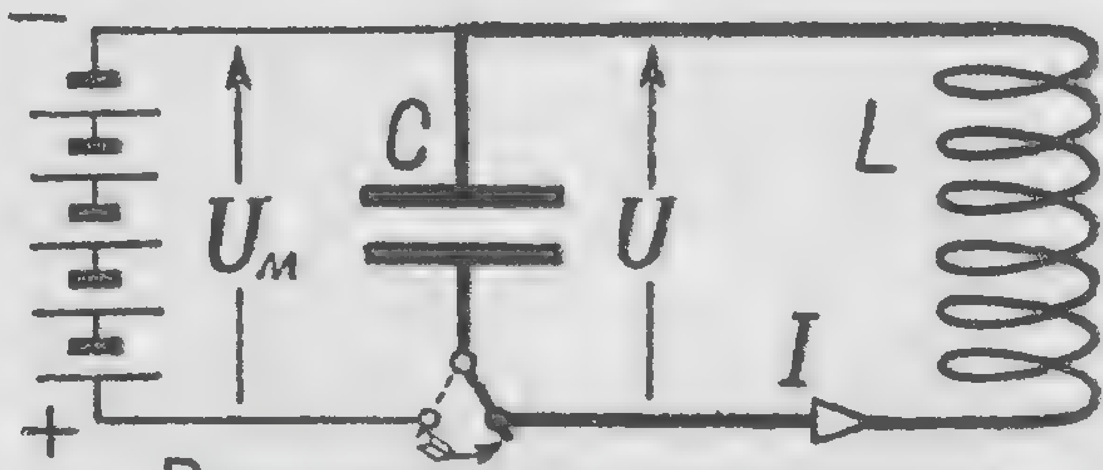


Колебание энергии между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора

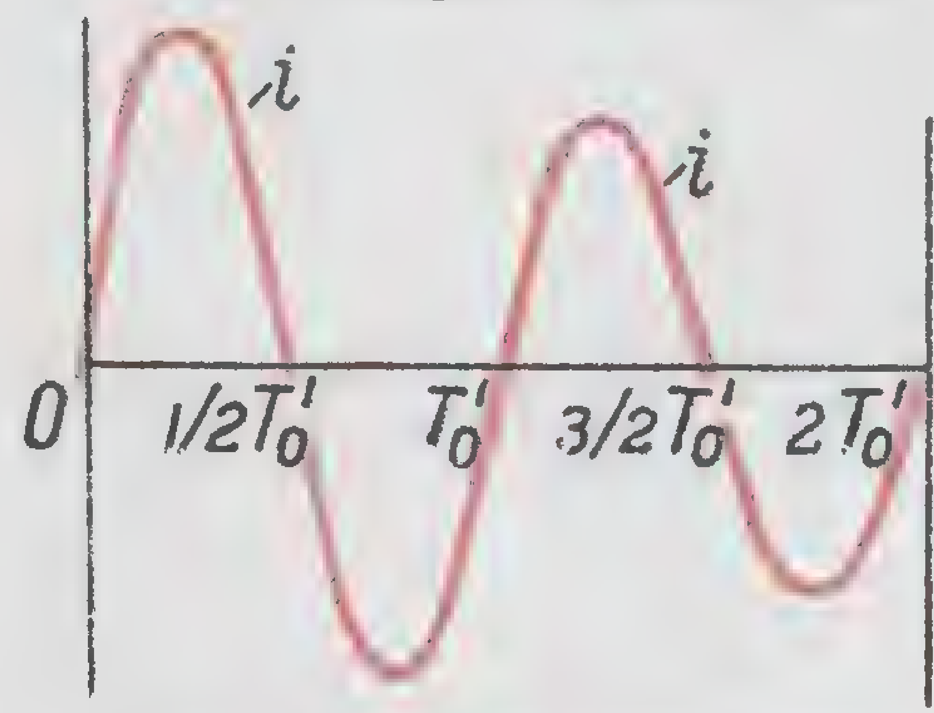
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

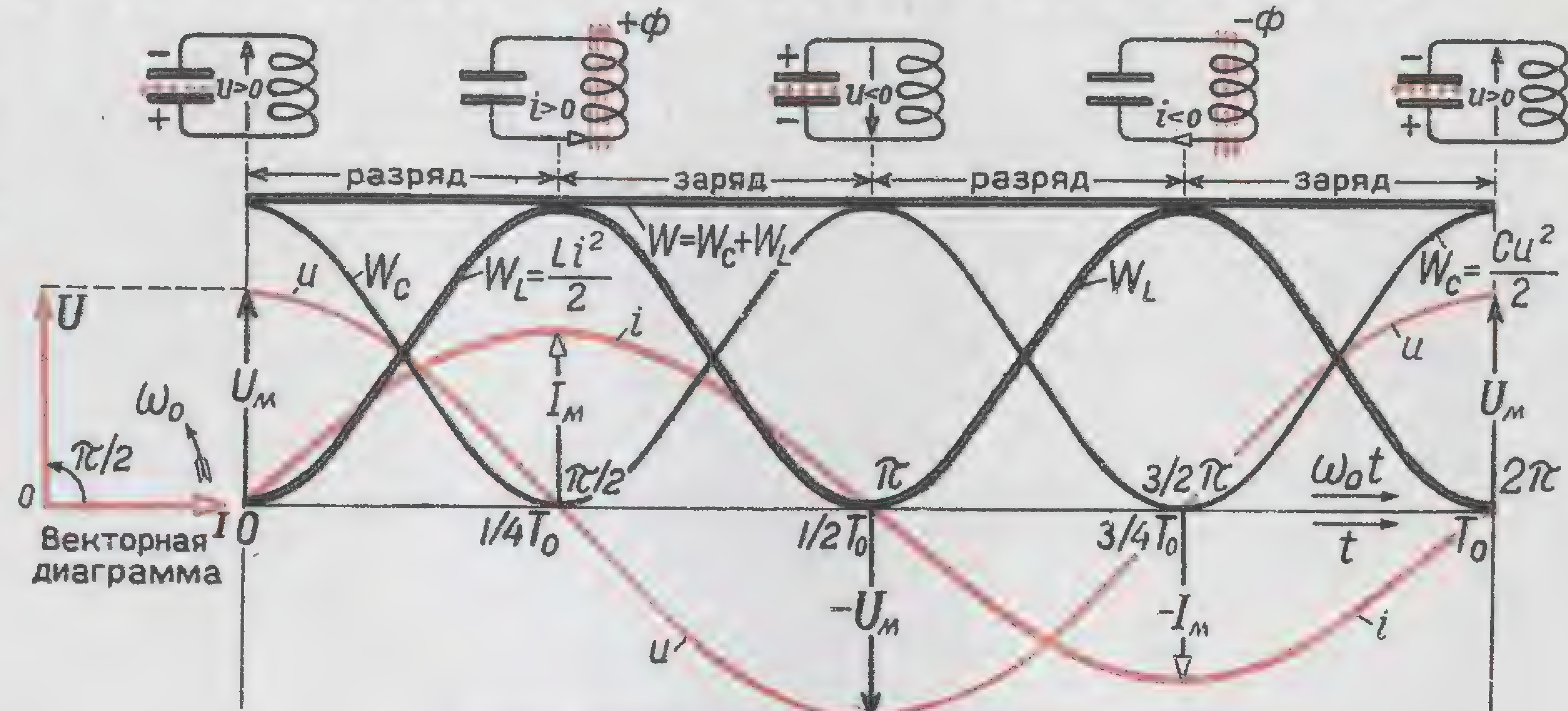
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР



Разряд конденсатора на индуктивность



Затухающие колебания в контуре с потерями



Колебание энергии в идеальном контуре

$$W=\frac{CU_м^2}{2}=\frac{LI_м^2}{2}\ дж$$

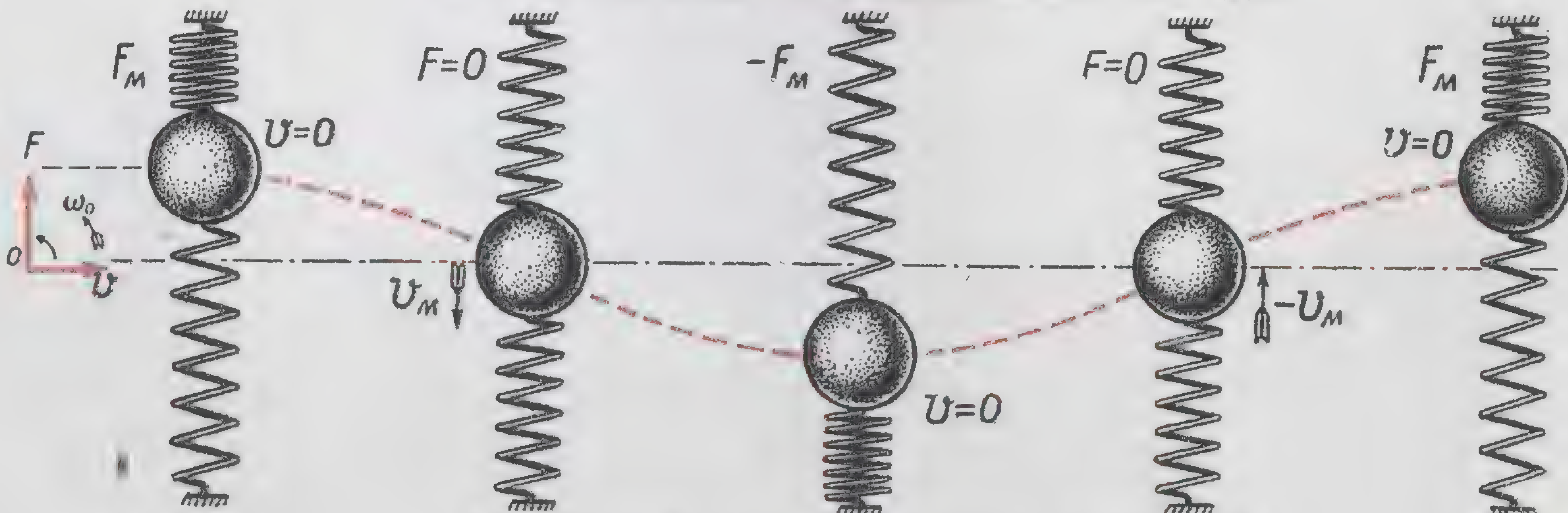
Запас энергии в идеальном контуре

$$\sqrt{\frac{L}{C}}=\frac{U}{I}\ ом$$

Характеристика контура

$$T_0=2\pi\sqrt{LC}\ сек$$

Период собственных колебаний. идеального контура

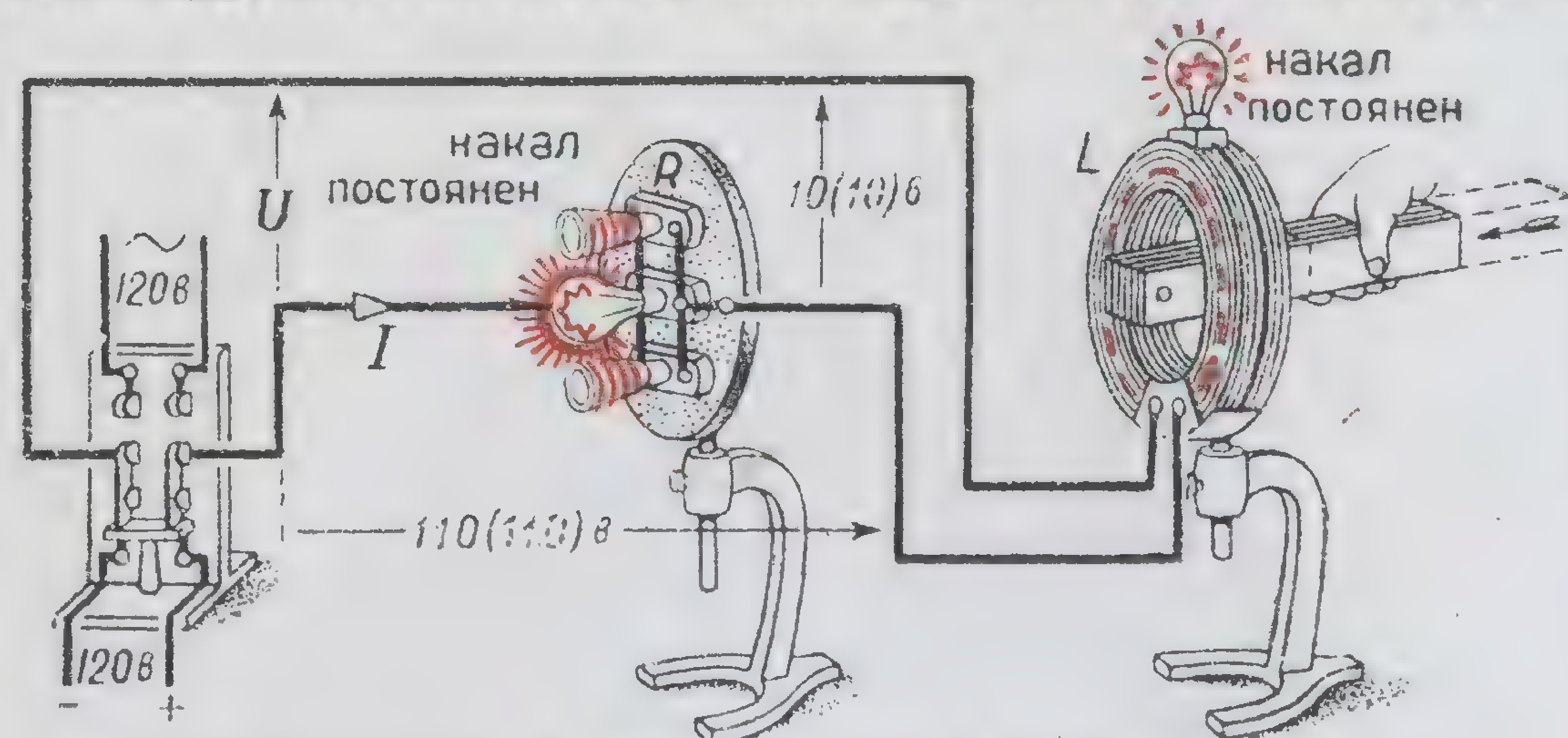


Механические колебания (аналогия)

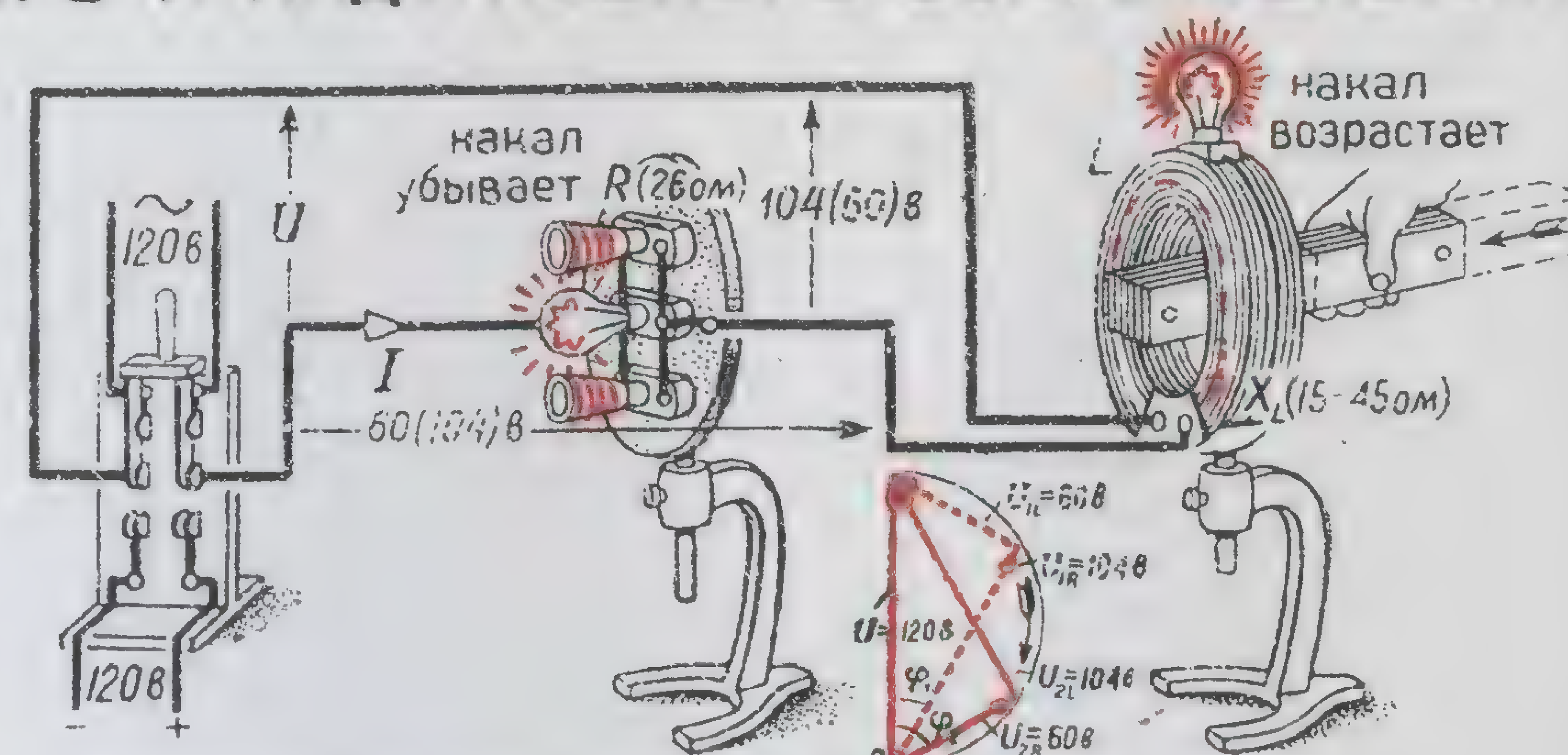
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ



Присоединение к постоянному напряжению



Присоединение к переменному напряжению

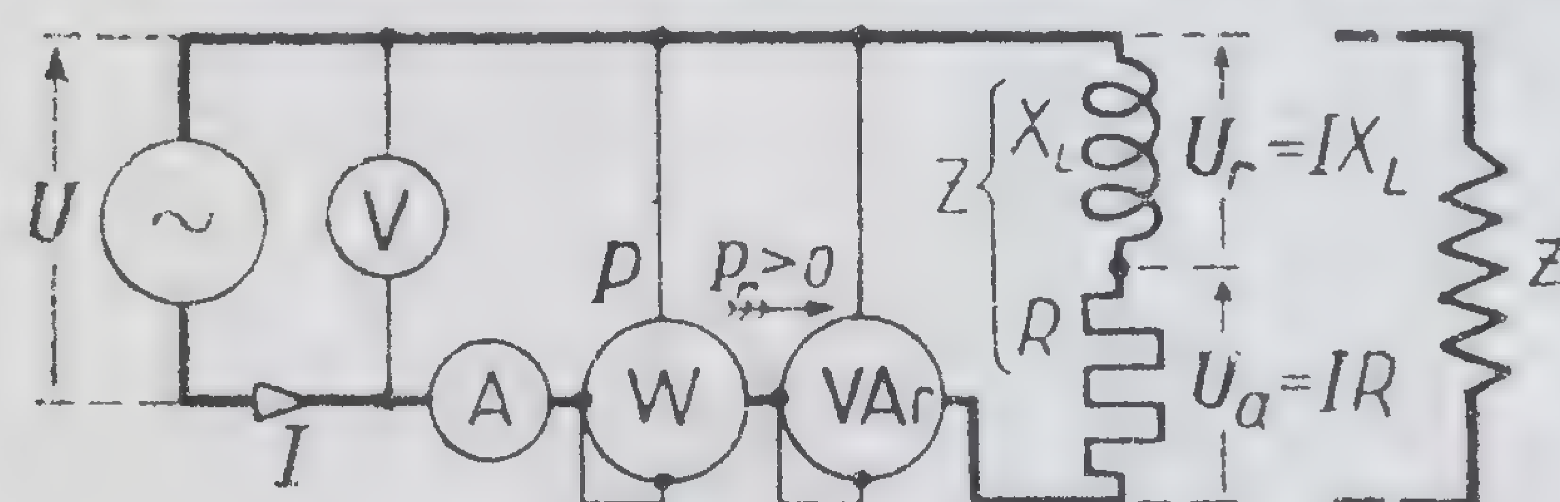
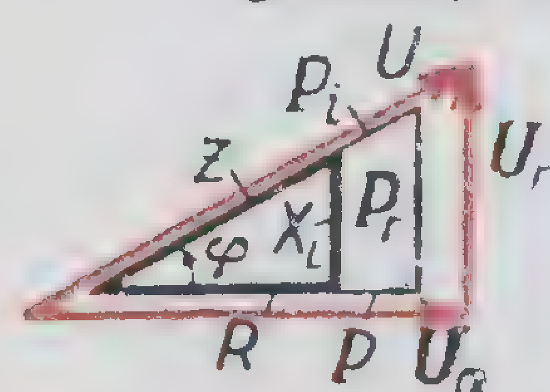
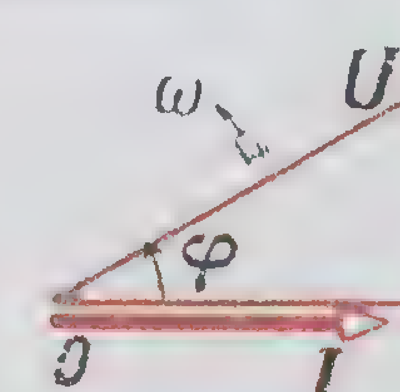


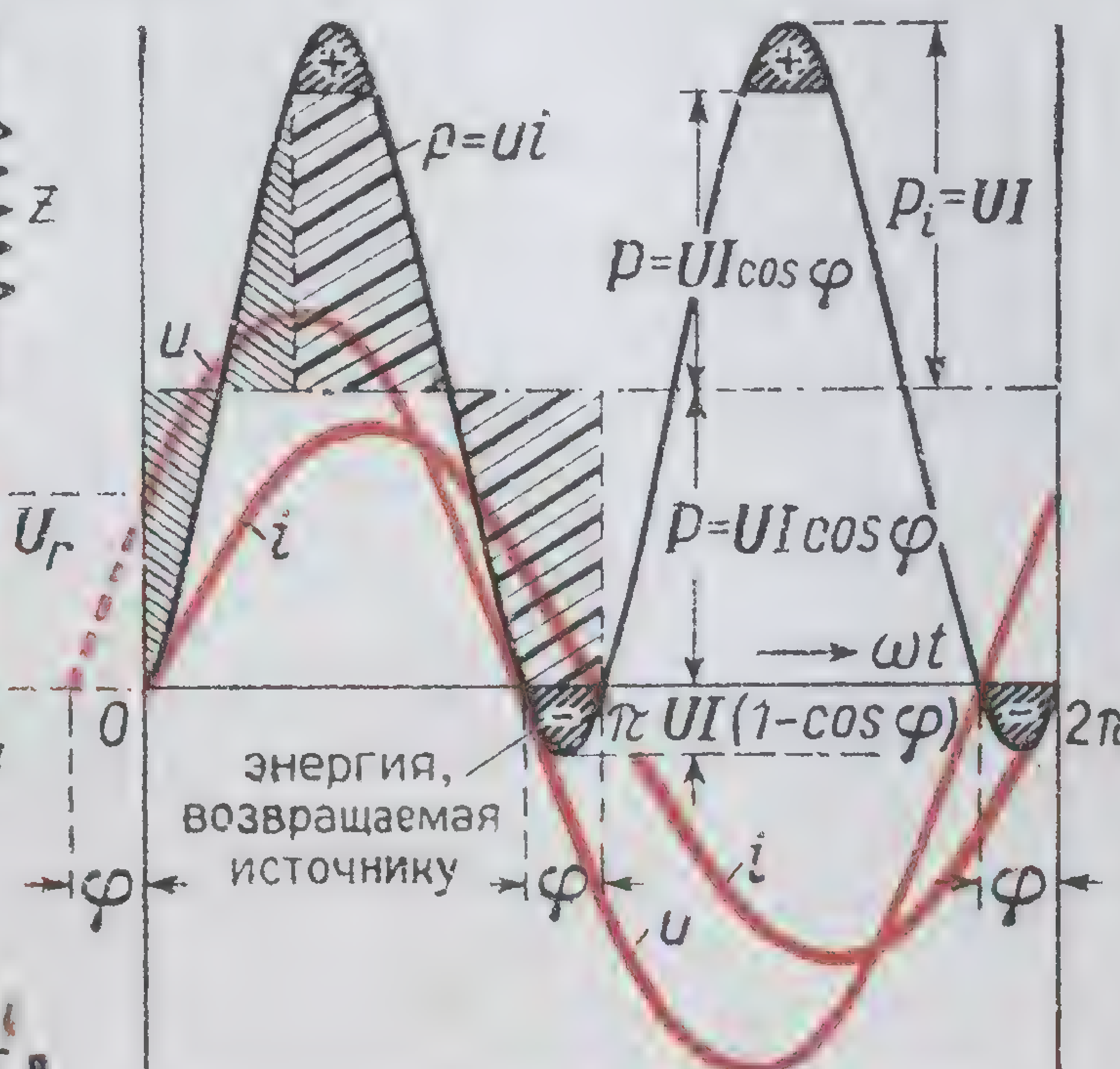
Схема соединений



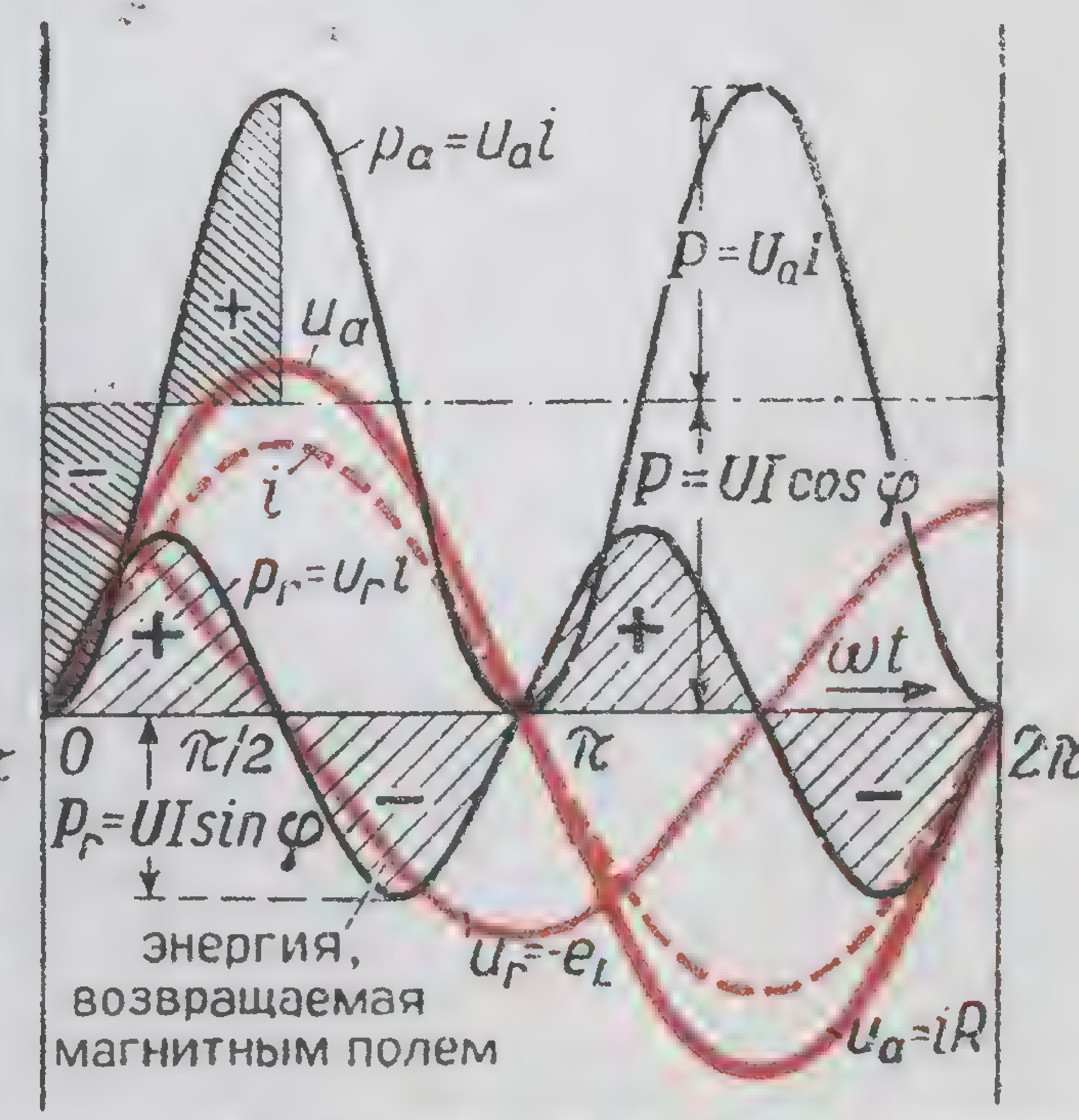
Подобные треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей



Векторная диаграмма



Кривые тока, напряжения и общей мощности



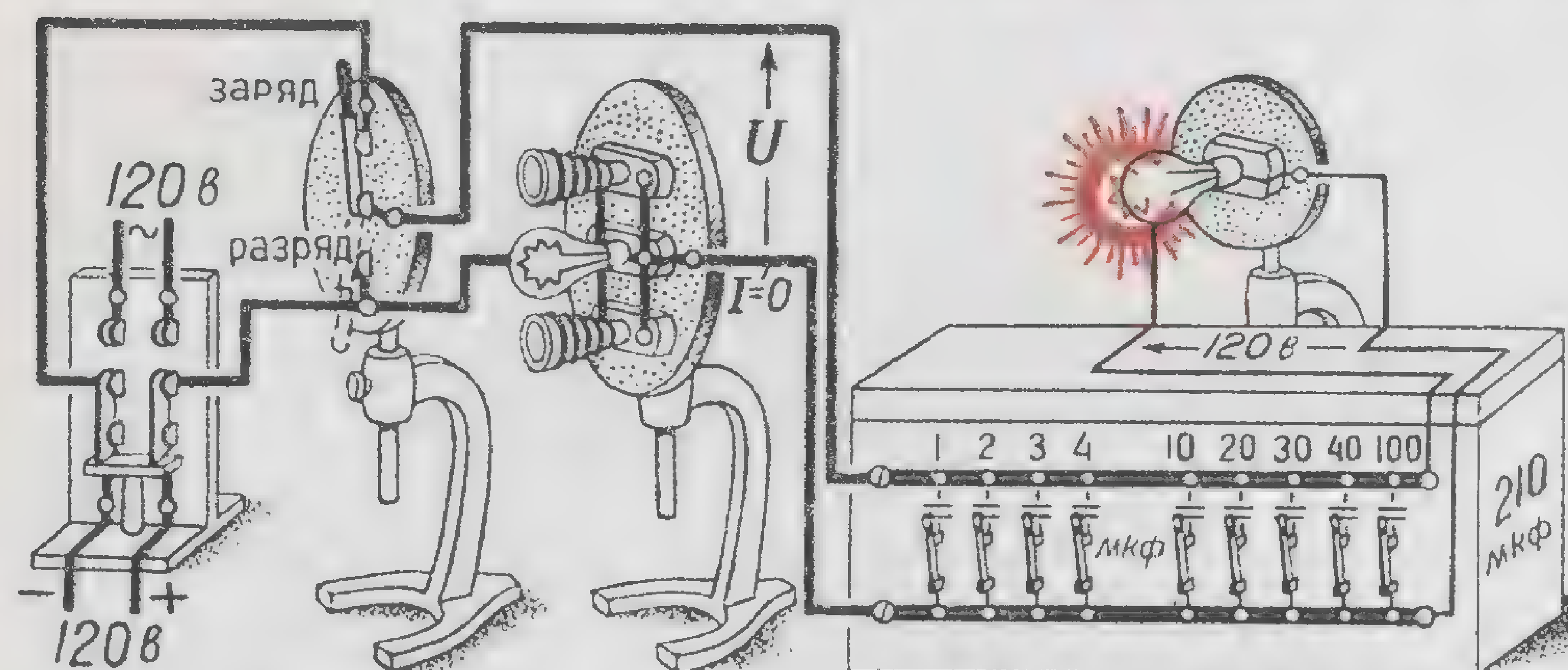
Кривые активных и реактивных слагающих напряжения и мощности

Приложенное напряжение ОПЕРЕЖАЕТ ток по фазе на угол φ

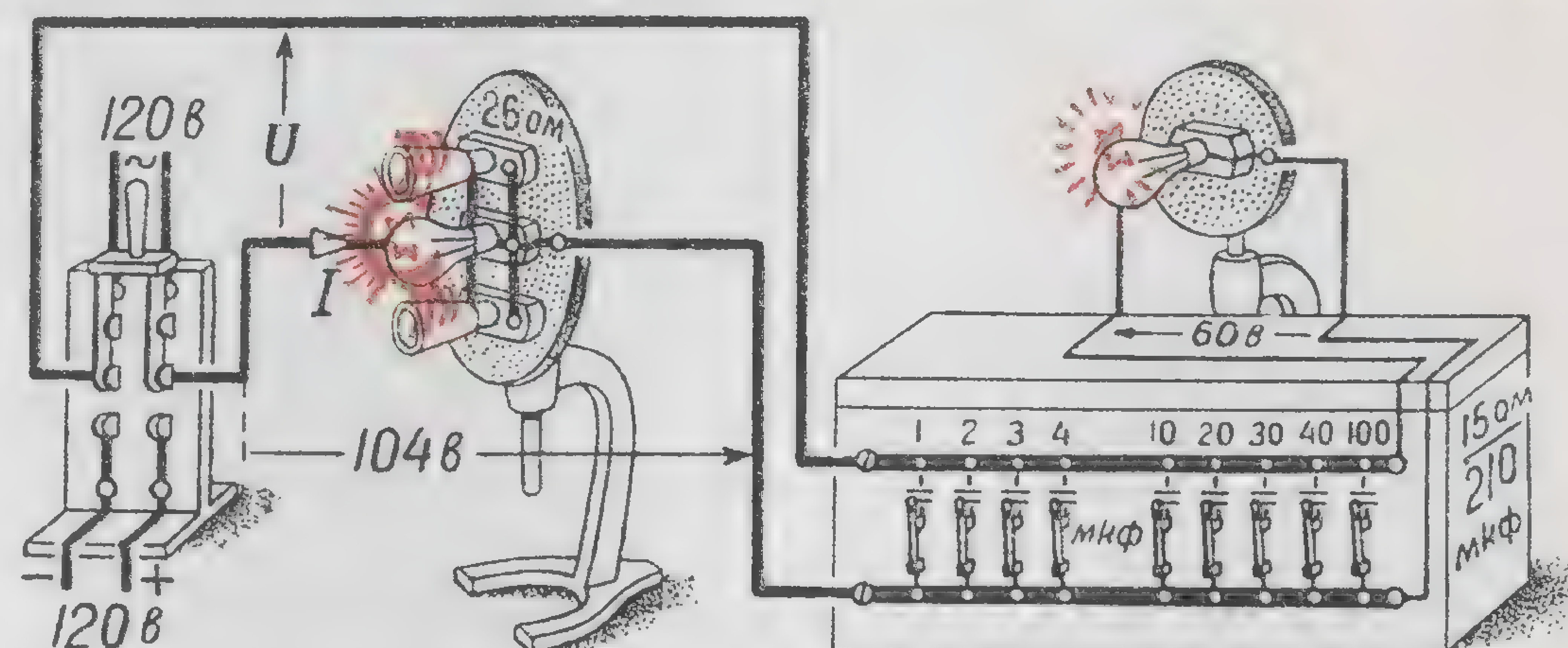
З.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ



Присоединение к постоянному напряжению



Присоединение к переменному напряжению

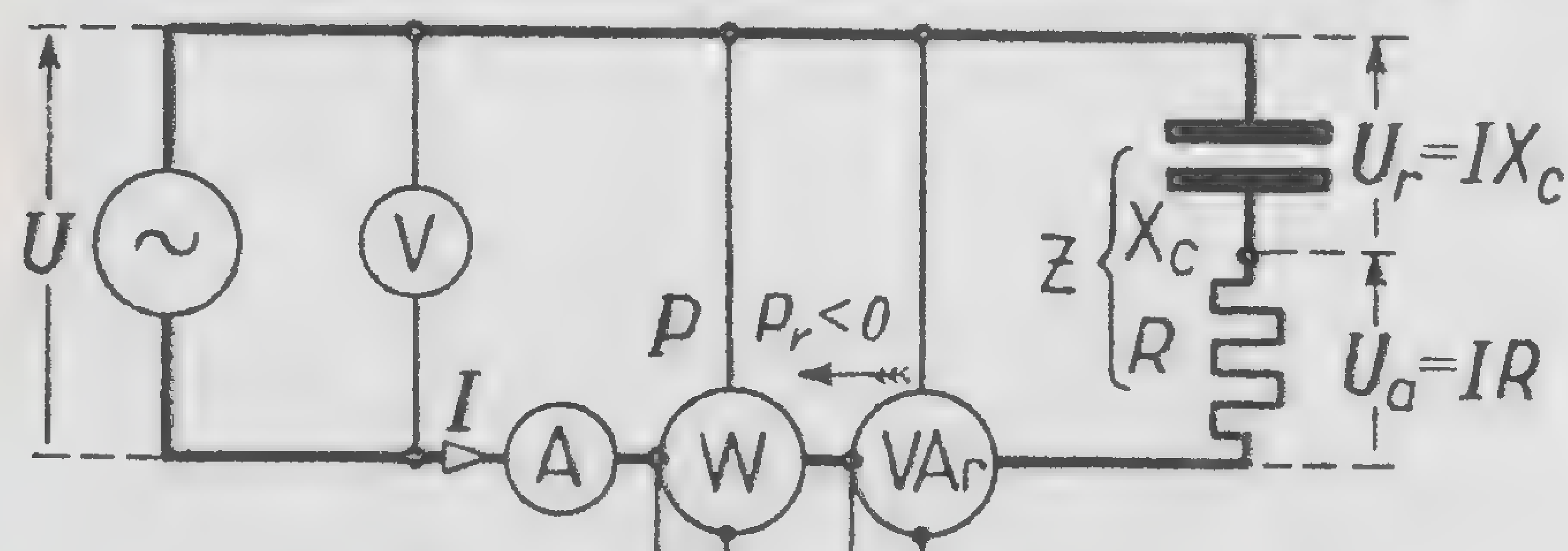
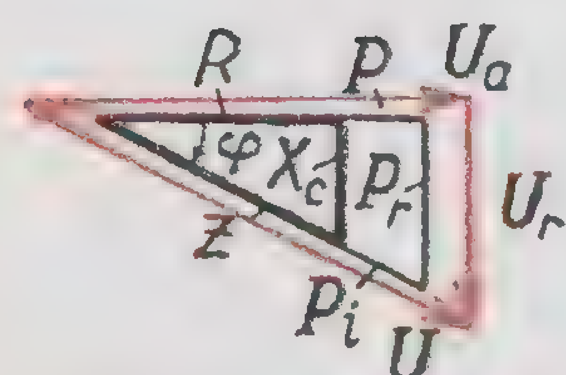
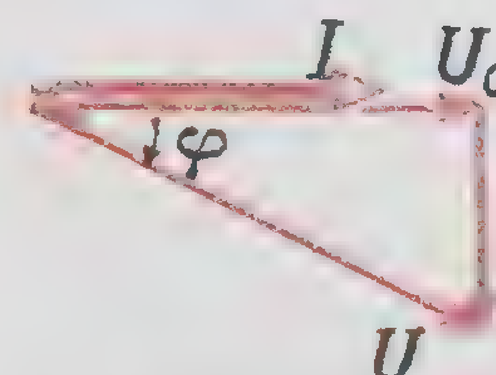


Схема соединений

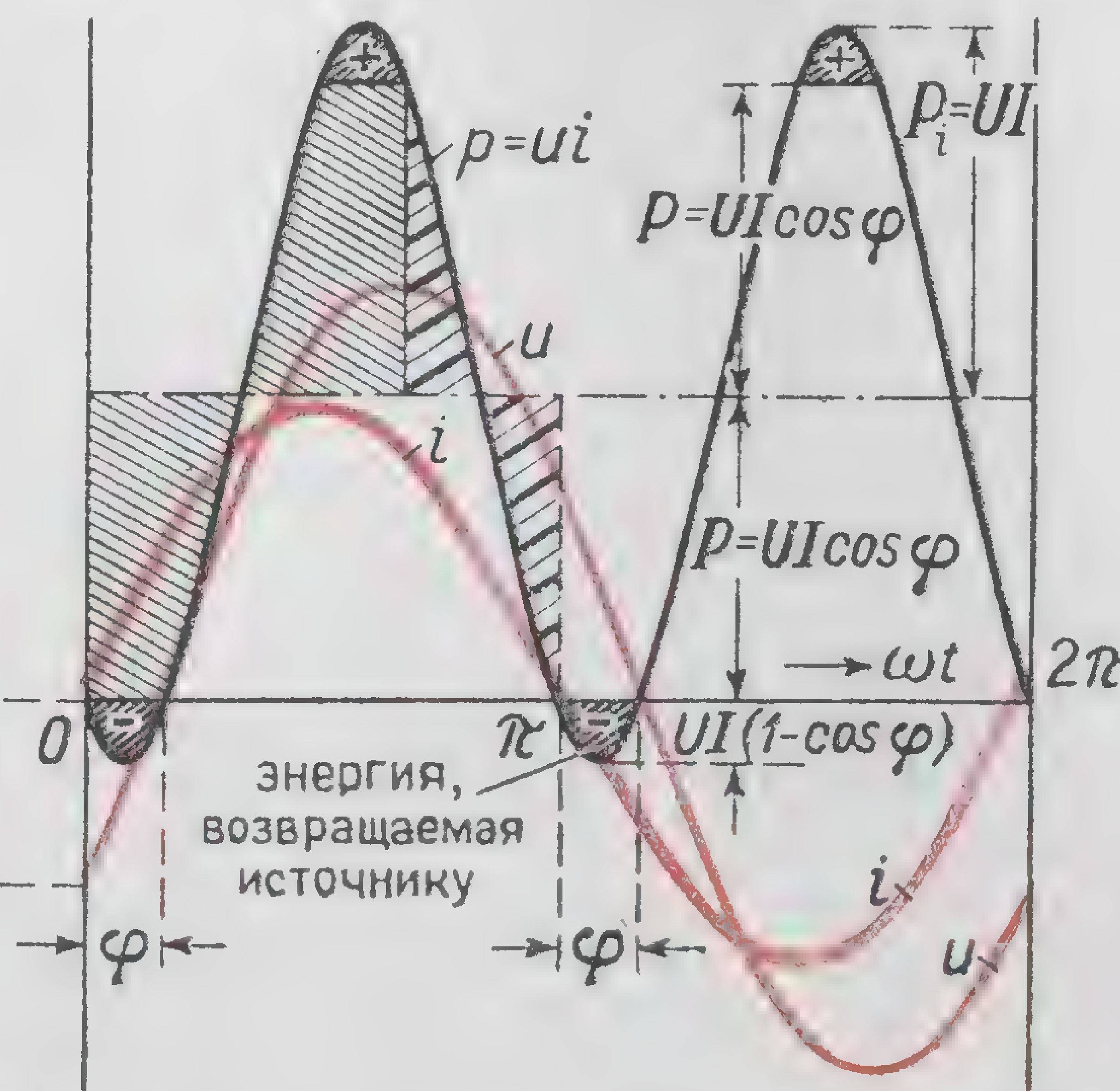


Подобные треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей



Векторная диаграмма

Приложенное напряжение ОТСТАЕТ по фазе от тока на угол φ



Кривые тока, напряжения и общей мощности

Напряжения

активное	$U_a = U\cos\varphi = IR$	в
реактивное	$U_r = U\sin\varphi = IX$	
общее	$U = \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = IZ$	

Сопротивления

активное	$R = Z\cos\varphi = U_a/I$	ом
реактивное	$X = Z\sin\varphi = U_r/I$	
полное	$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = U/I$	

Мощности

активная	$P = UI\cos\varphi = U_a I = I^2 R$	вт
реактивная	$P_r = UI\sin\varphi = U_r I = I^2 X$	вар
кажущаяся	$P_i = UI = \sqrt{P^2 + P_r^2} = I^2 Z$	ва

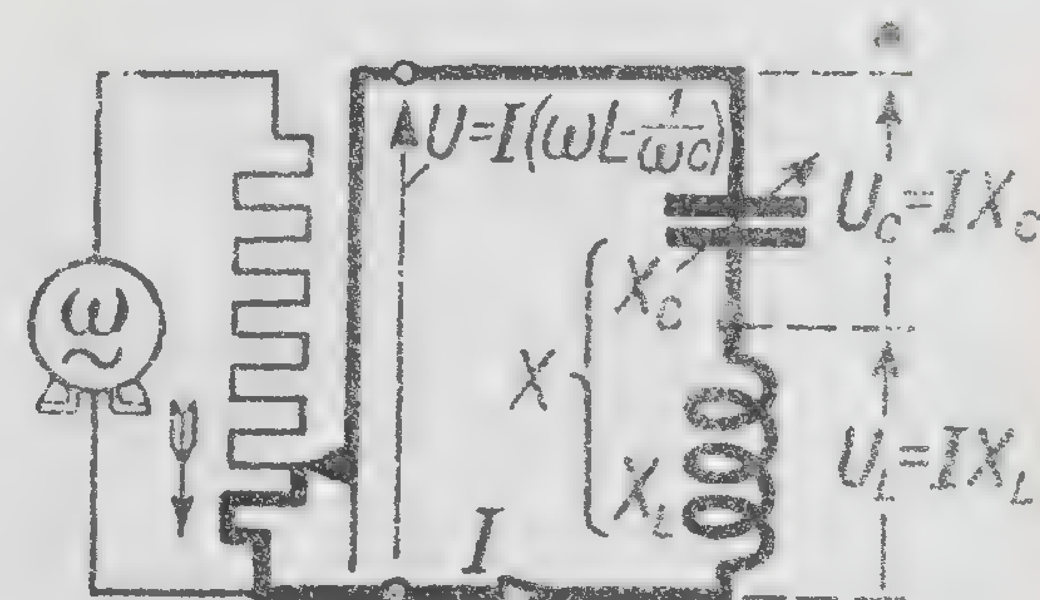
Коэффициент мощности

$\cos\varphi = P/UI = U_a/U = R/Z$

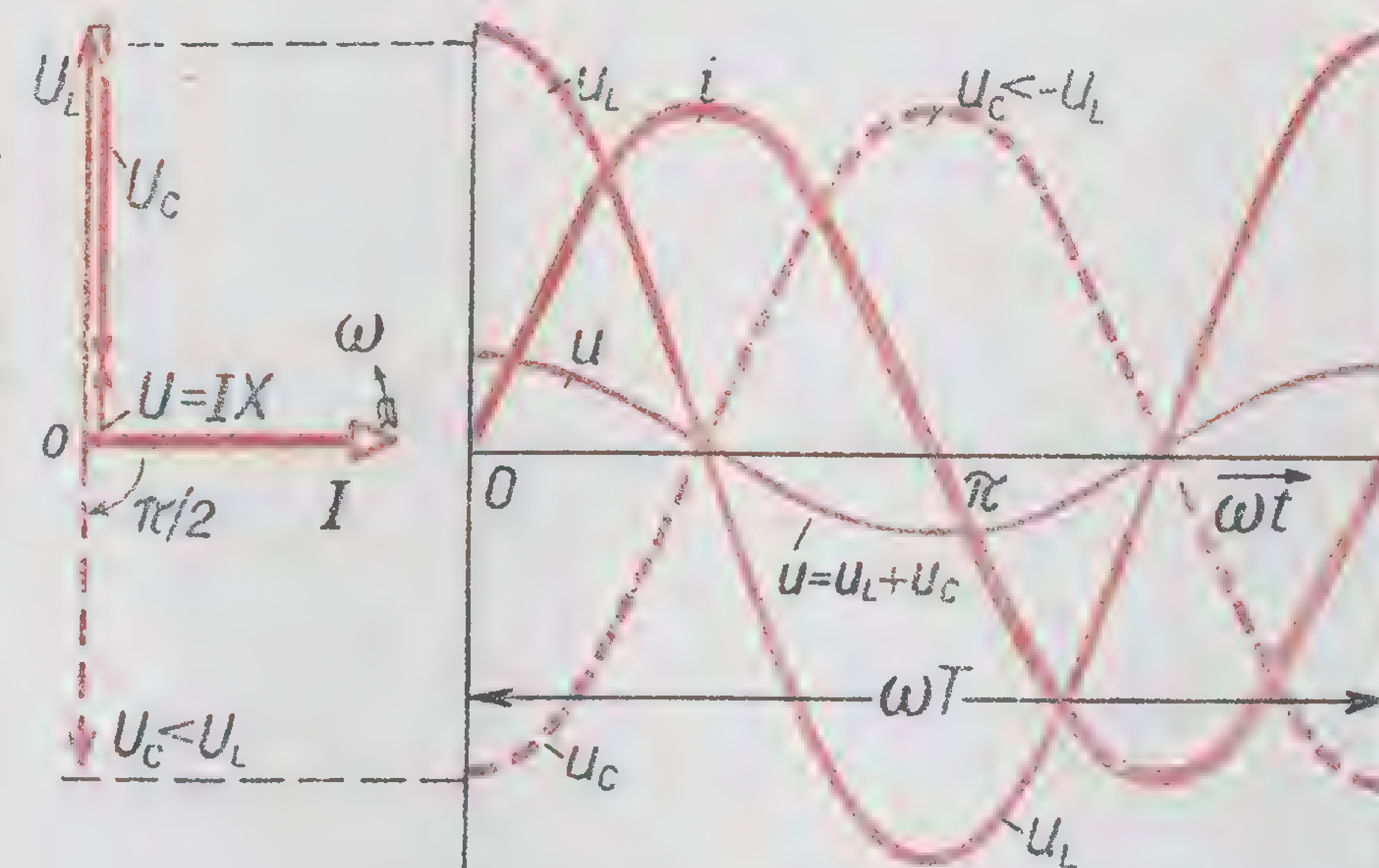
Э.И. Расовский

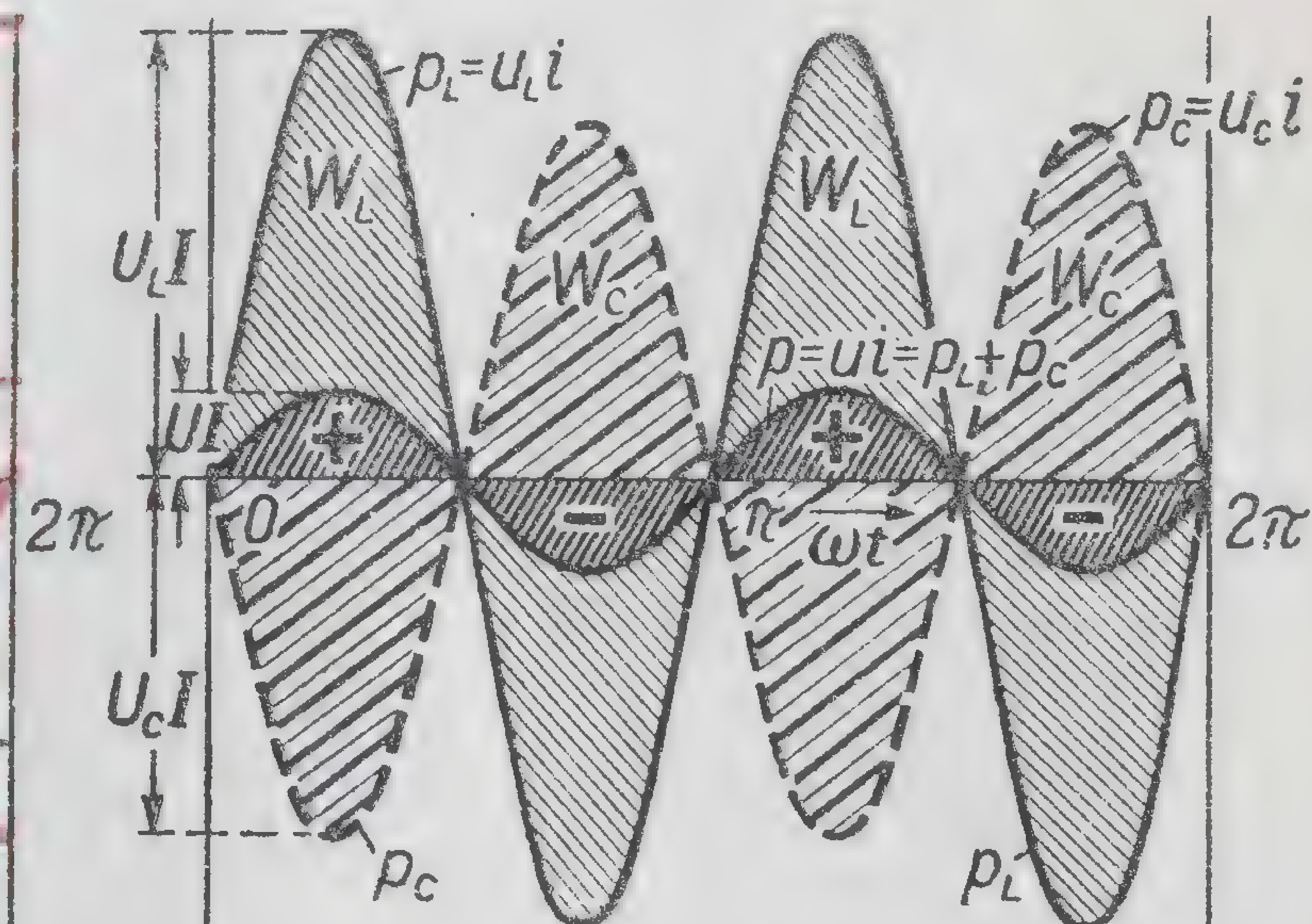
Худ. А. Меньшиков

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

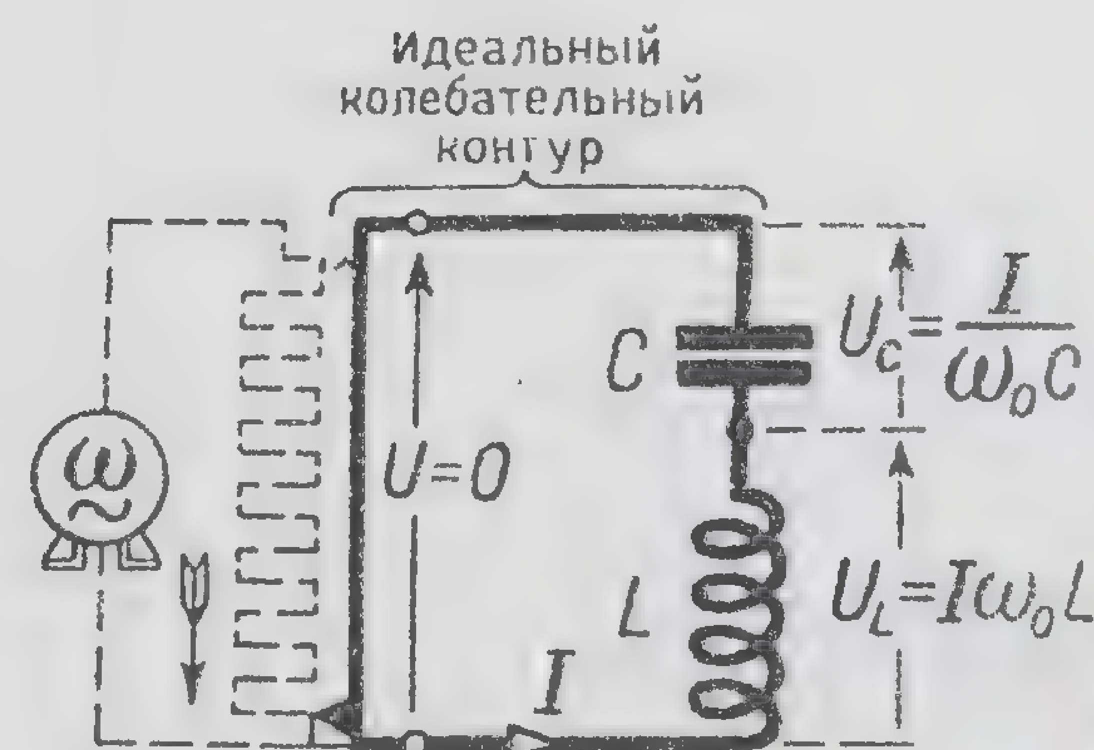


Емкостное сопротивление меньше индуктивного





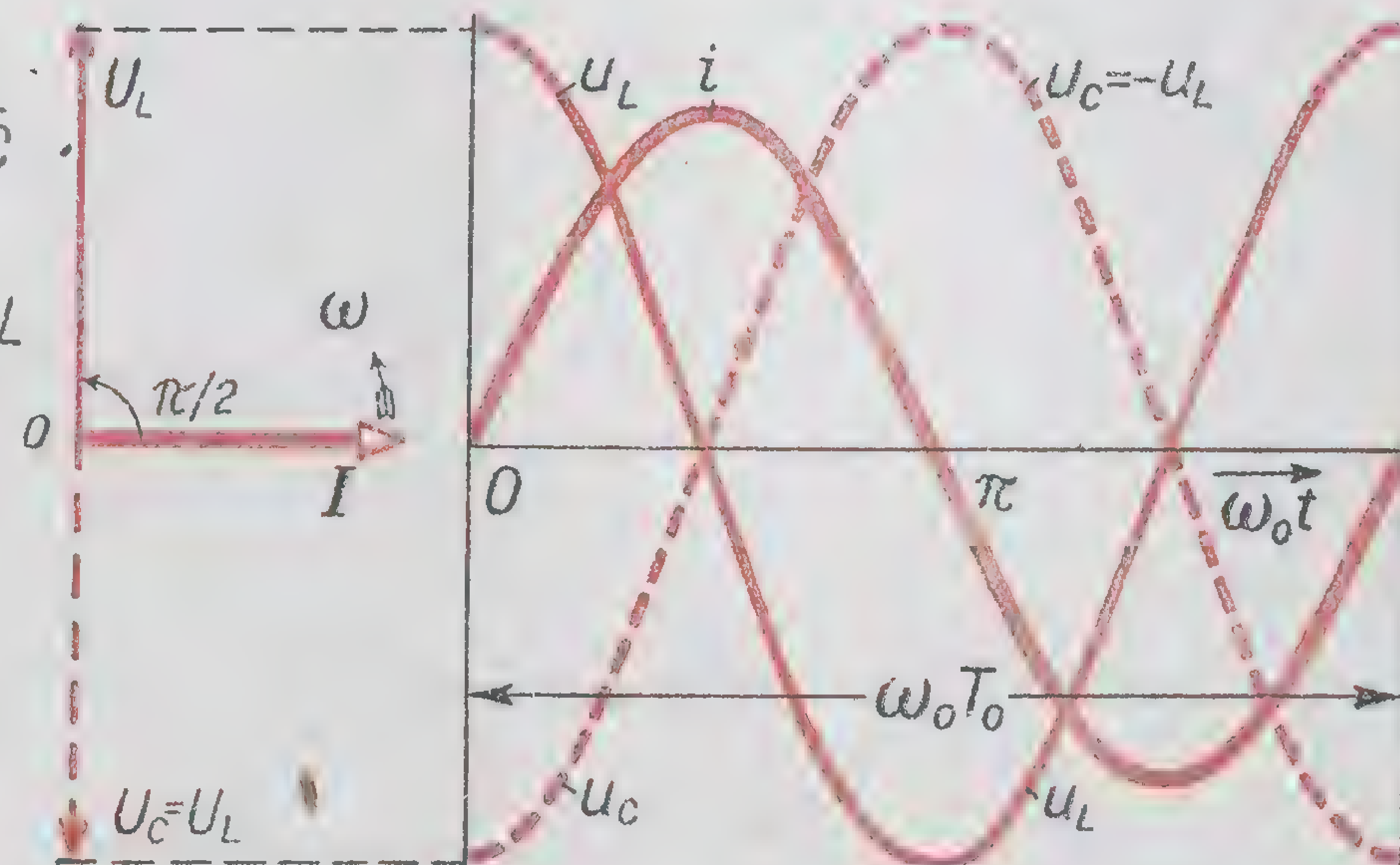
Диаграммы при емкостном сопротивлении, меньшем индуктивного

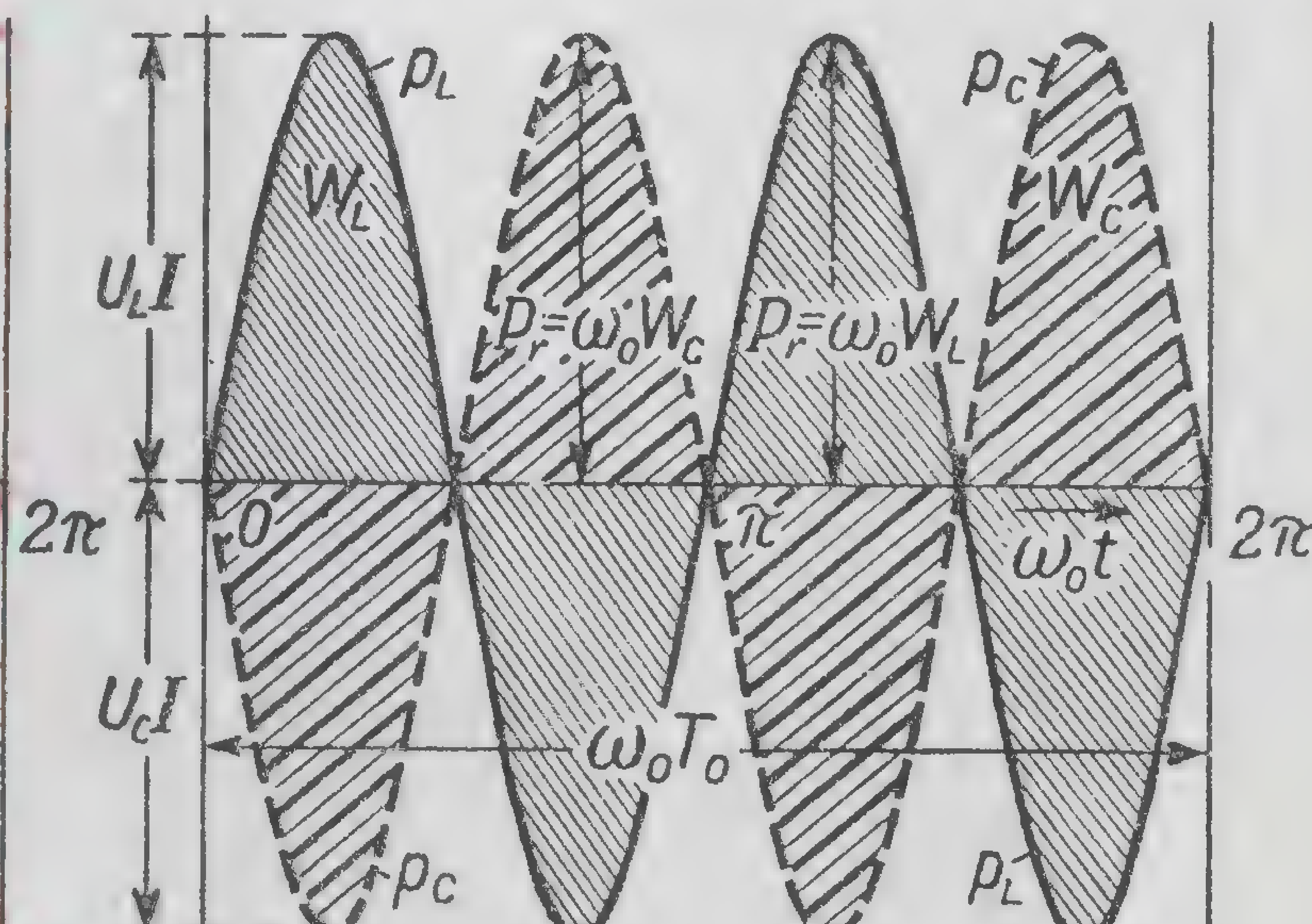


Емкостное сопротивление равно индуктивному

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\omega \ сек^{-1}$$

Угловая частота идеального контура



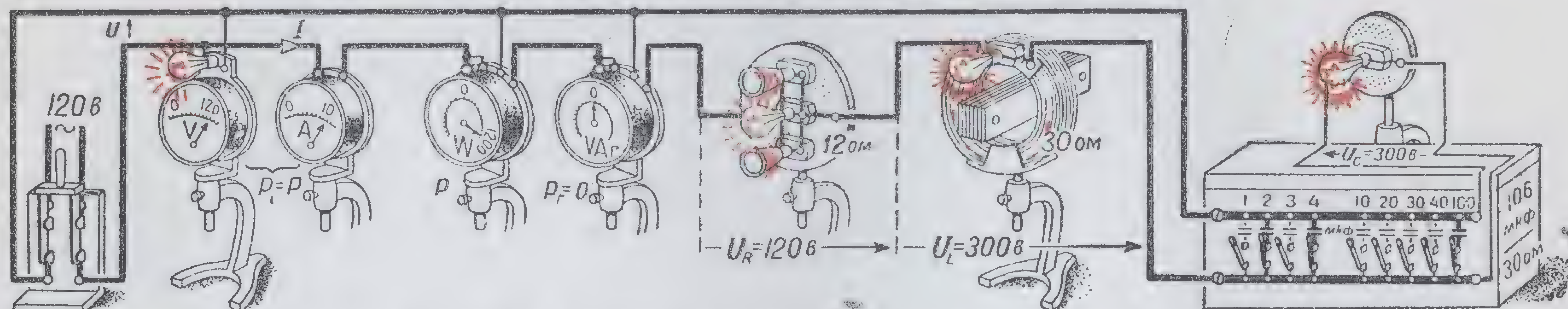


Диаграммы при емкостном сопротивлении, равном индуктивному

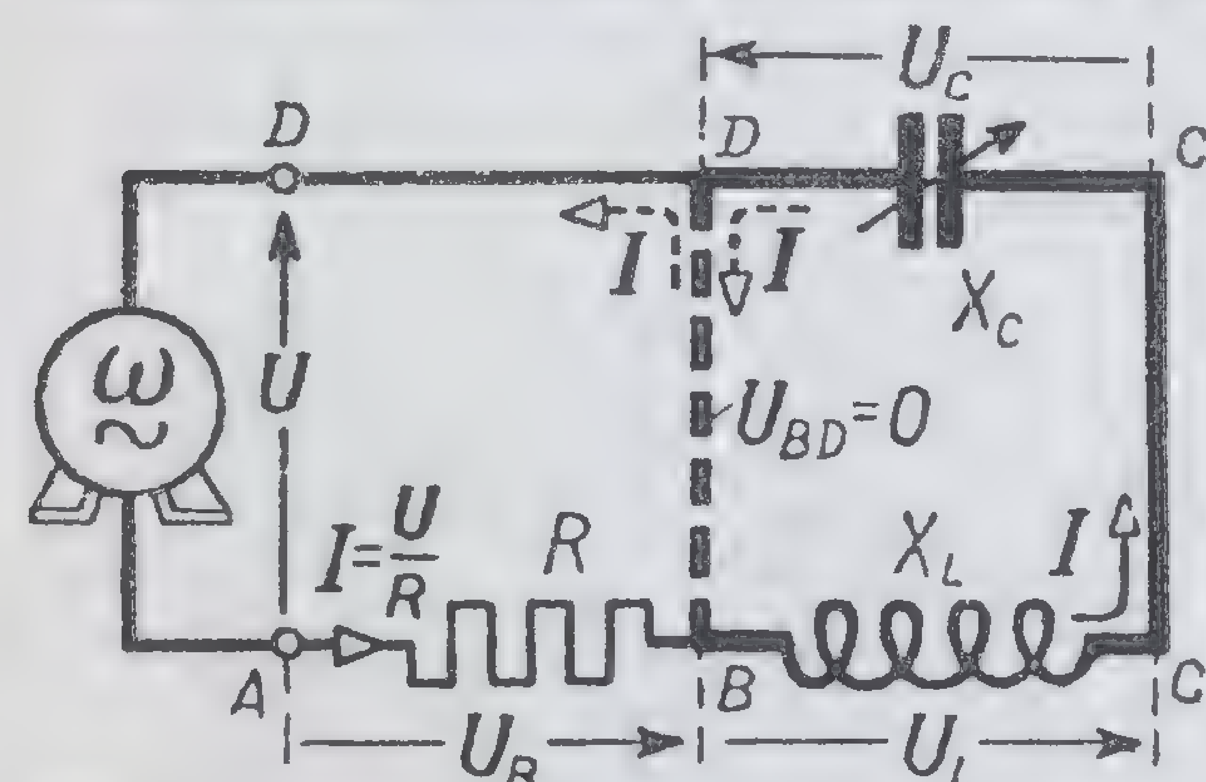
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

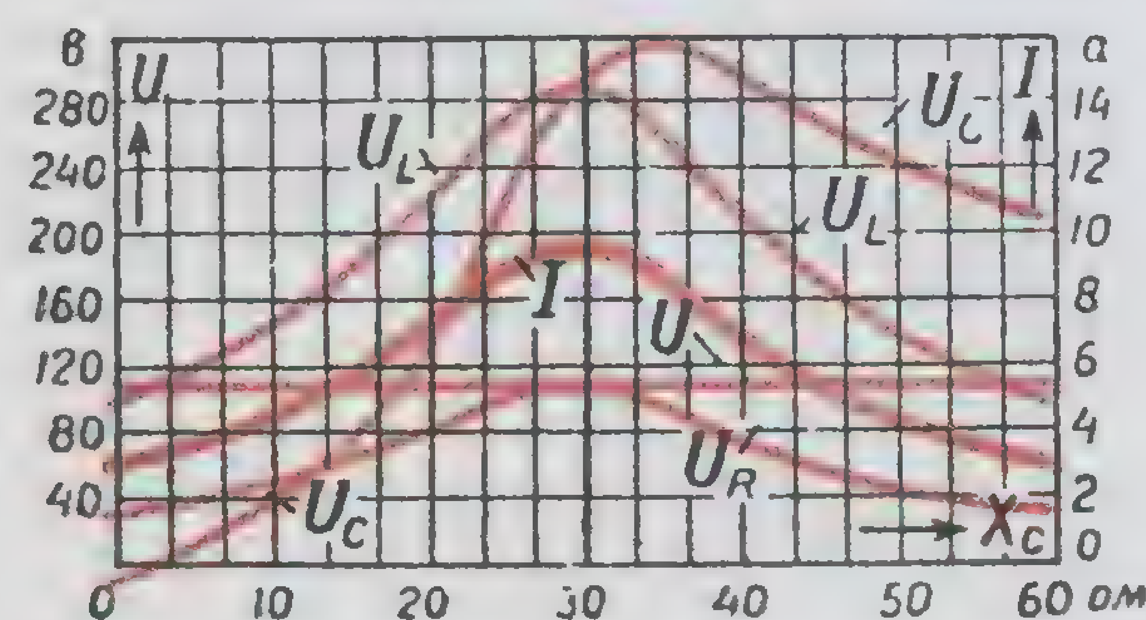
РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ



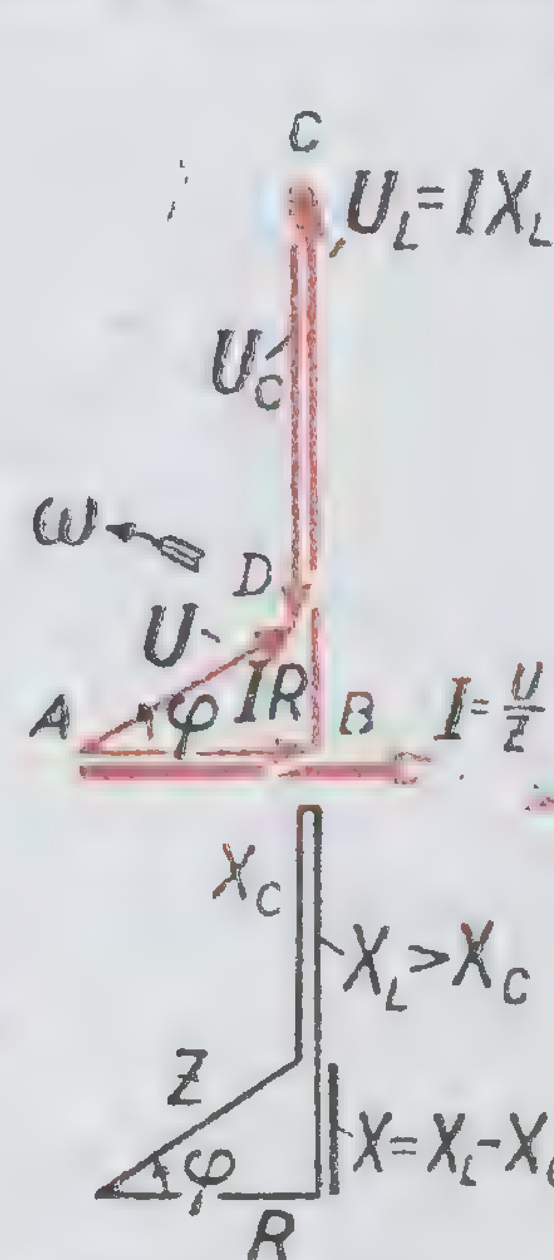
Последовательное соединение лампового реостата, реактивной катушки и конденсатора переменной ёмкости



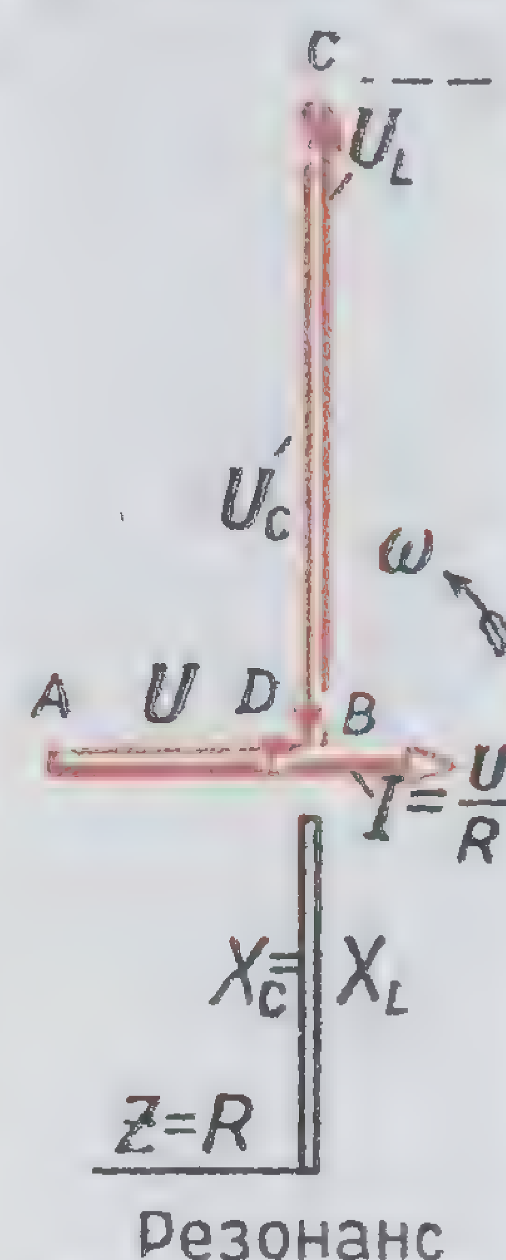
Последовательная цепь при резонансе



Кривые резонанса при переменной ёмкости



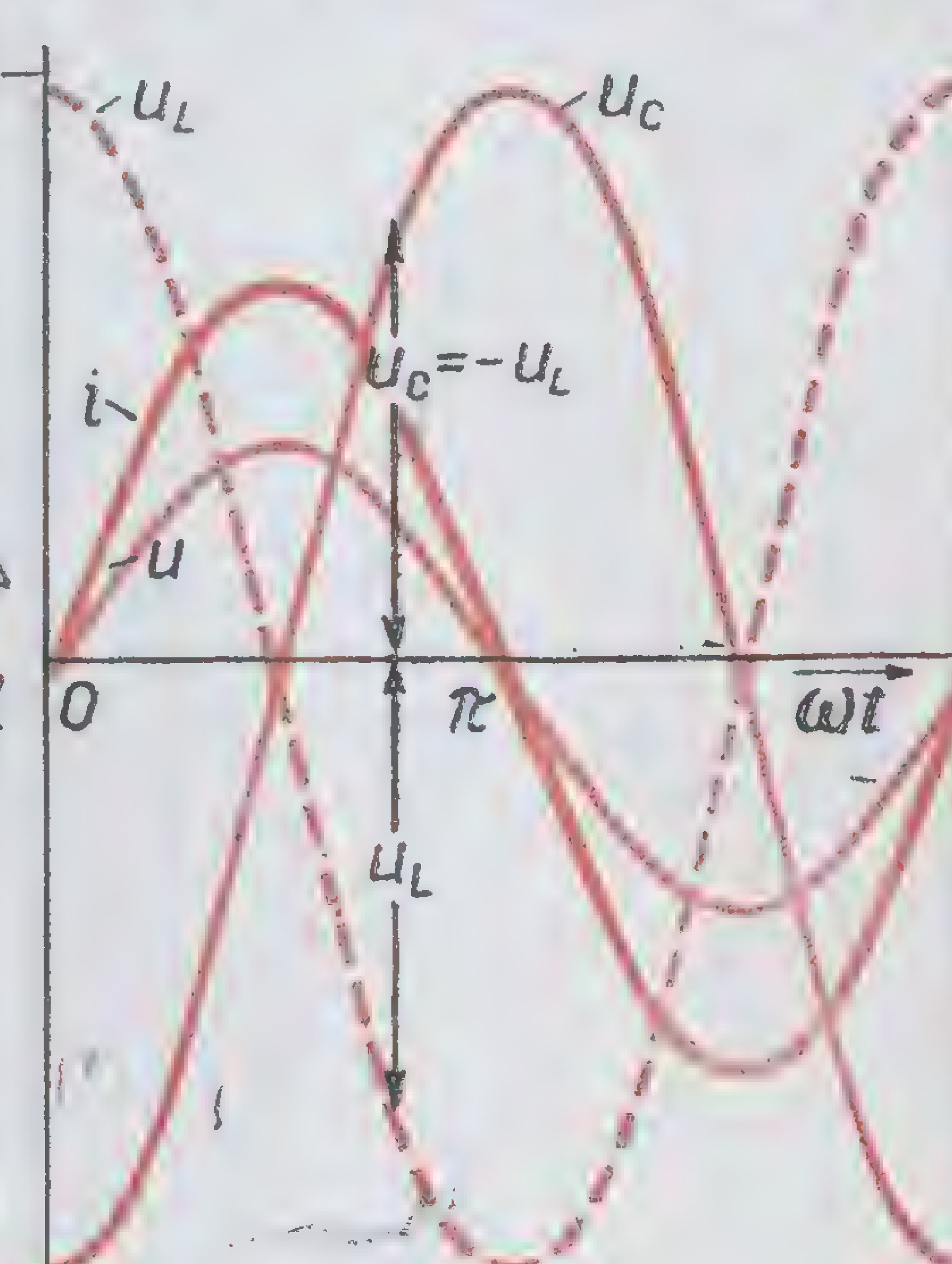
Диаграммы напряжений и сопротивлений до резонанса



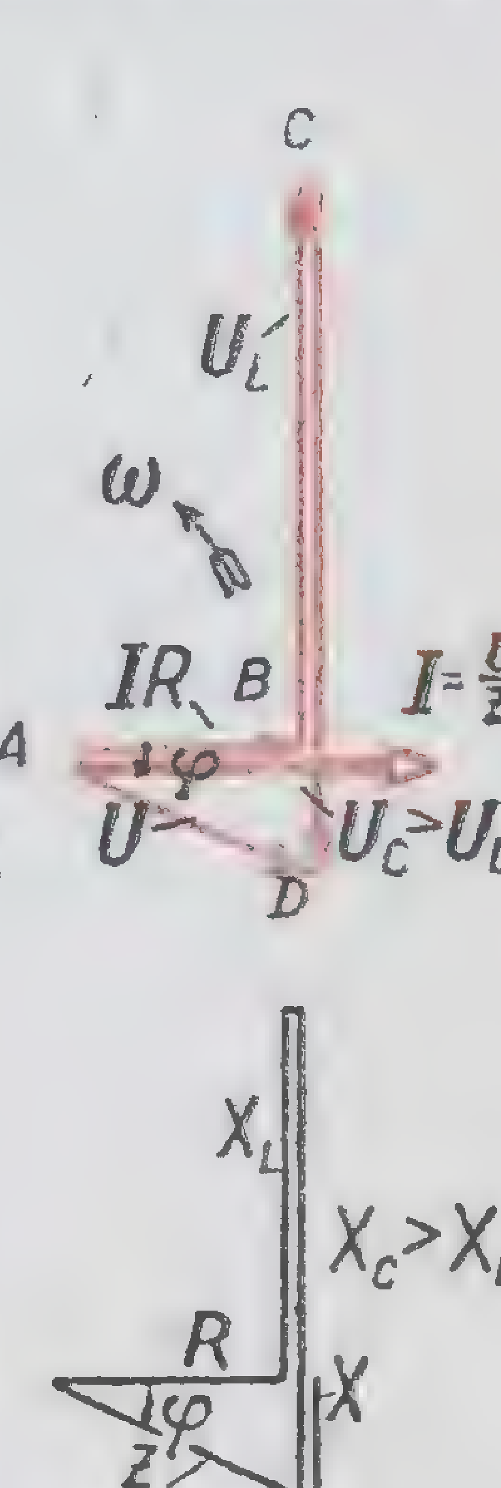
Резонанс

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

Условие резонанса



При резонансе емкостное напряжение равно индуктивному по величине, но противоположно ему по знаку

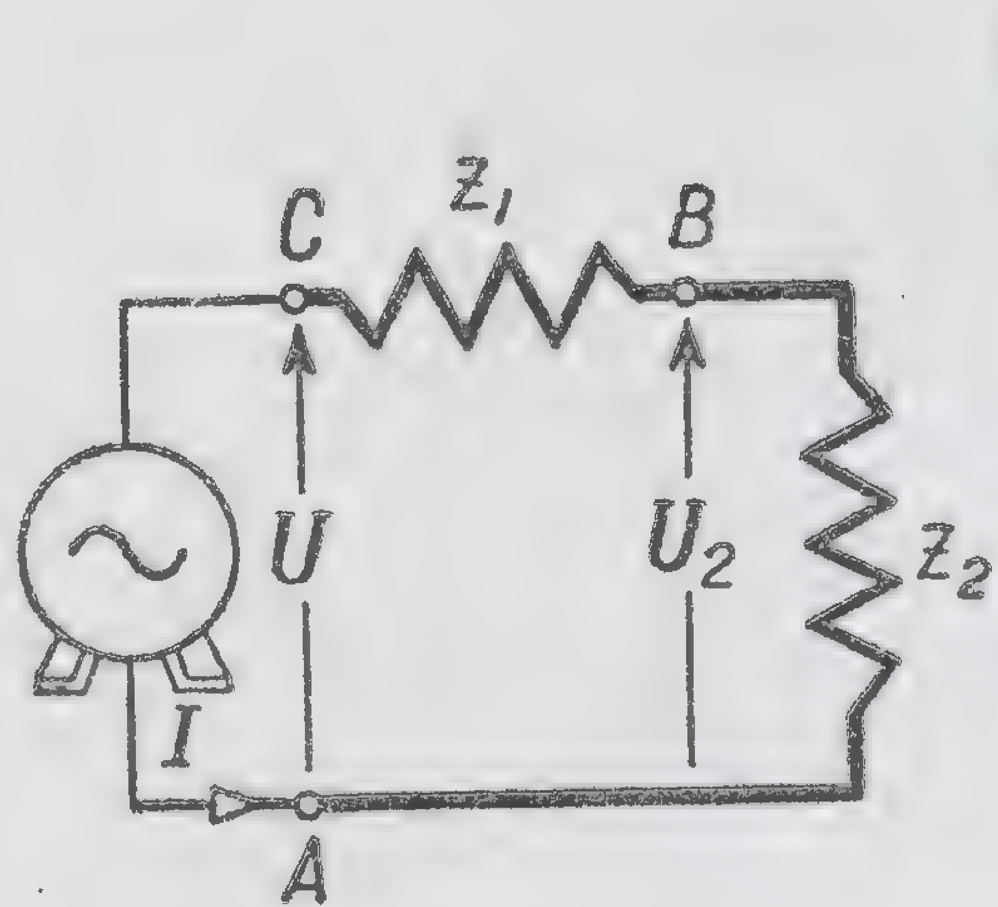


После резонанса

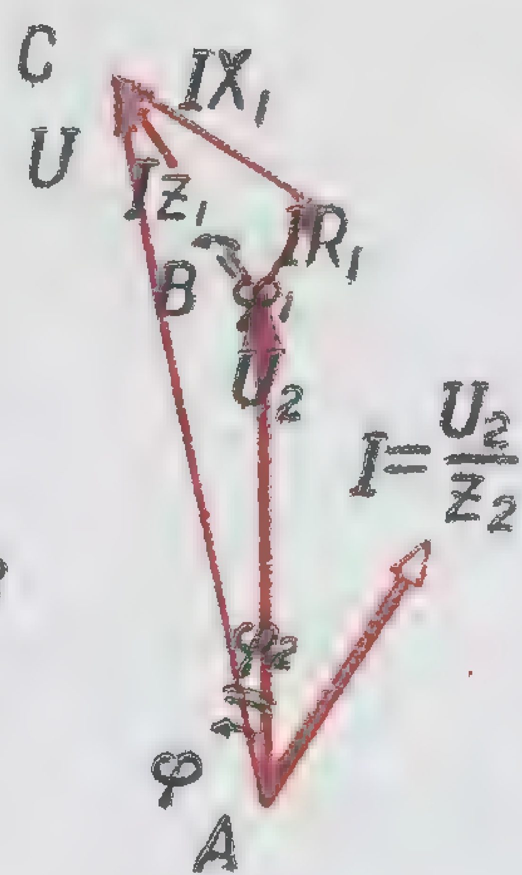
Э.И. Расовский

Худ А. Меньшиков

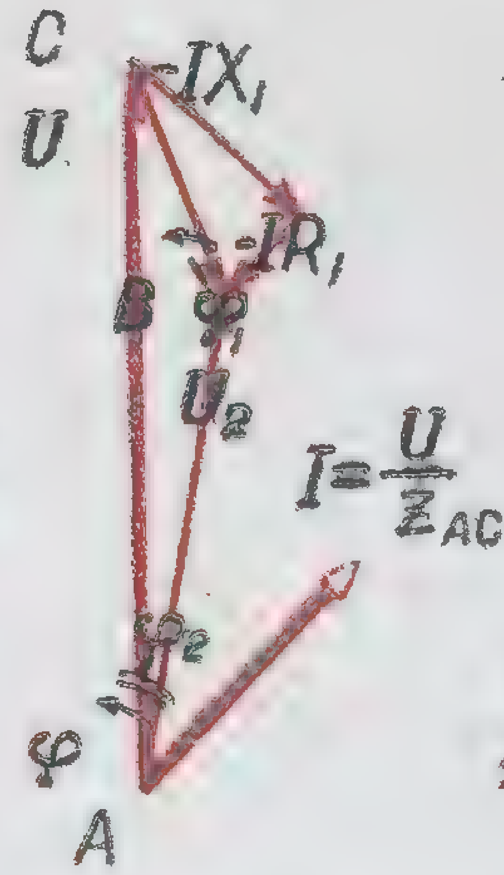
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



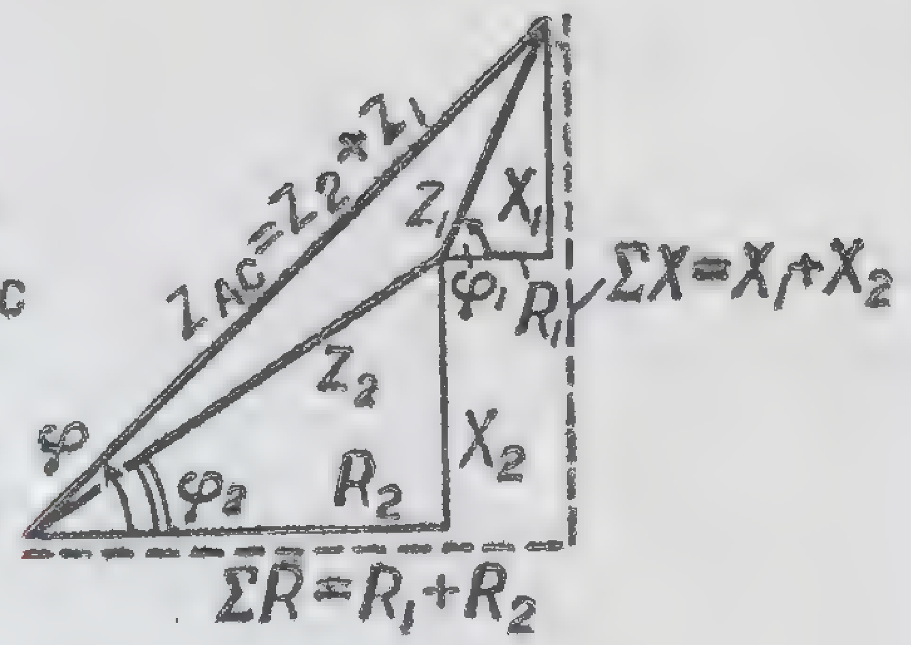
Два последовательно включенных участка



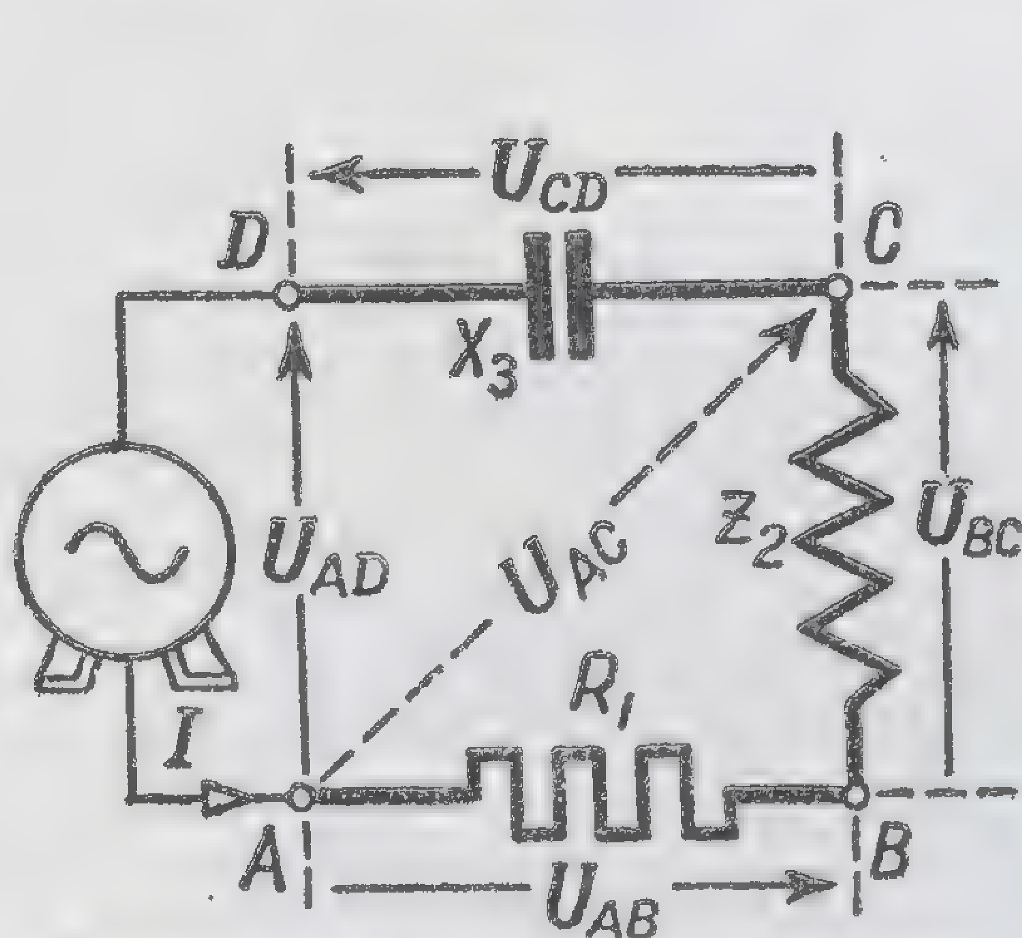
Векторная диаграмма при заданном U_2



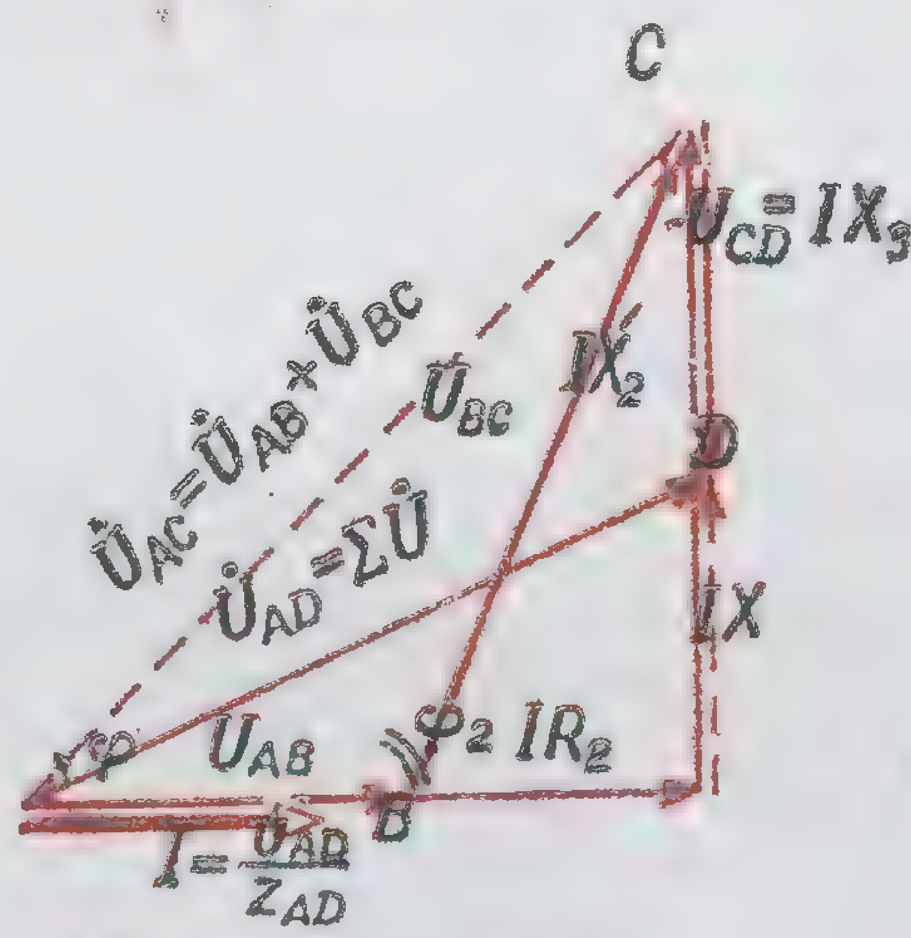
Векторная диаграмма при заданном U



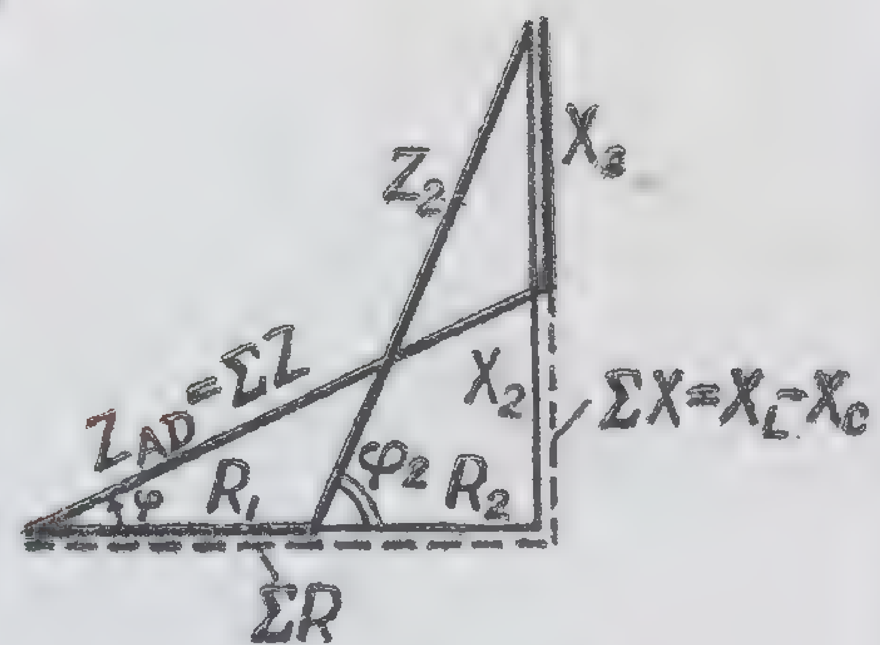
Определение общего сопротивления z_{AC}



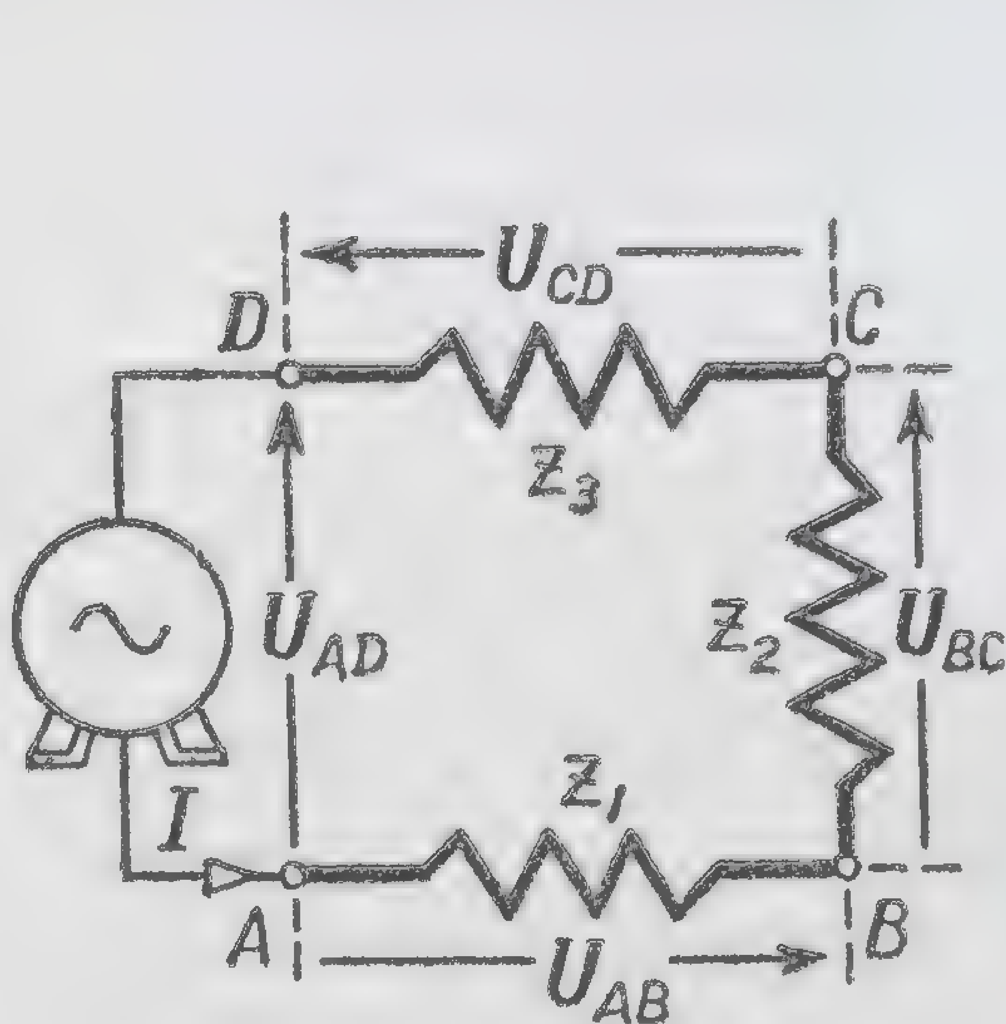
Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений



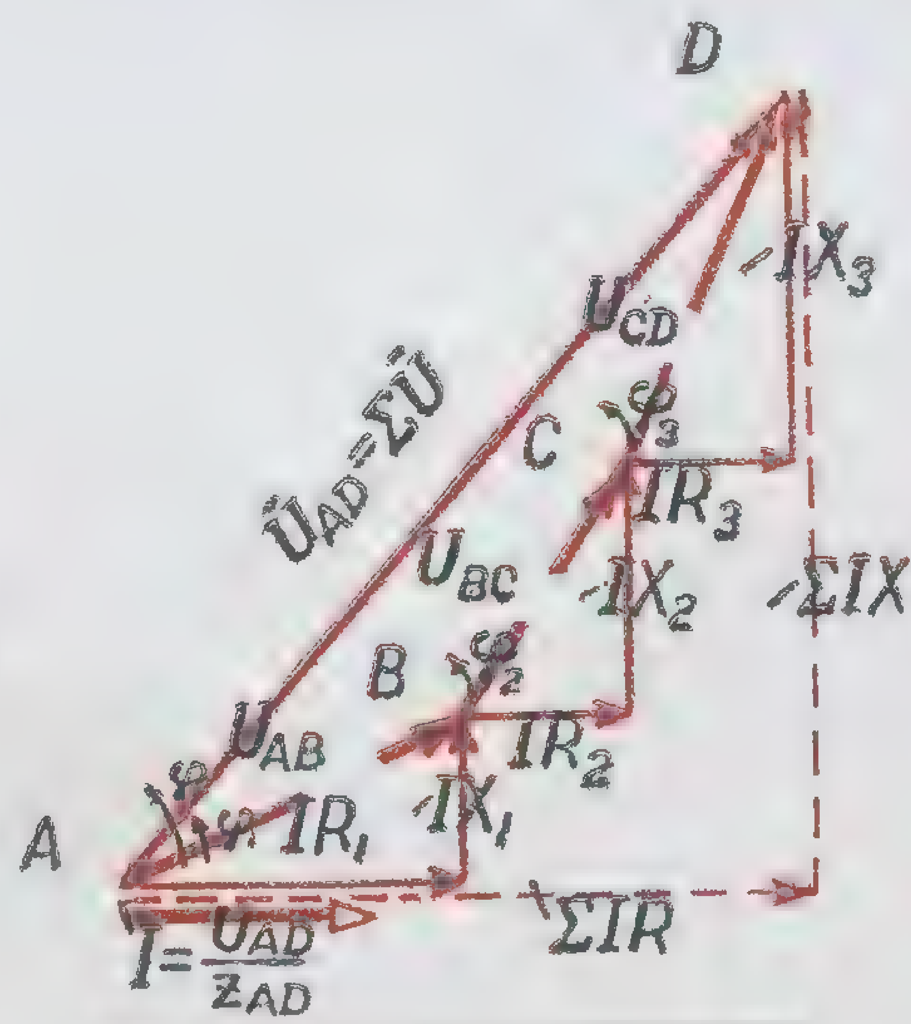
Геометрическое сложение напряжений

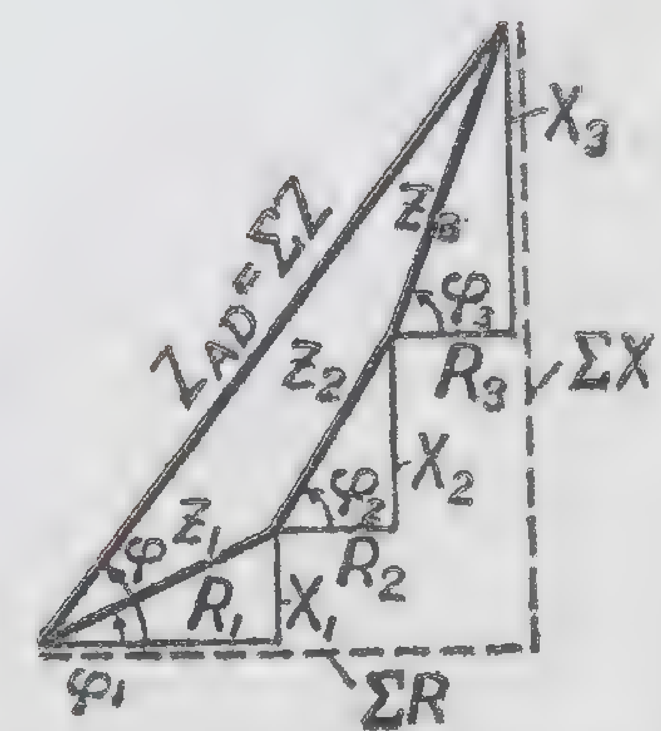


Геометрическое сложение сопротивлений



Последовательное соединение трёх катушек





$$U=\sqrt{(\Sigma IR)^2+(\Sigma IX)^2}\ в$$

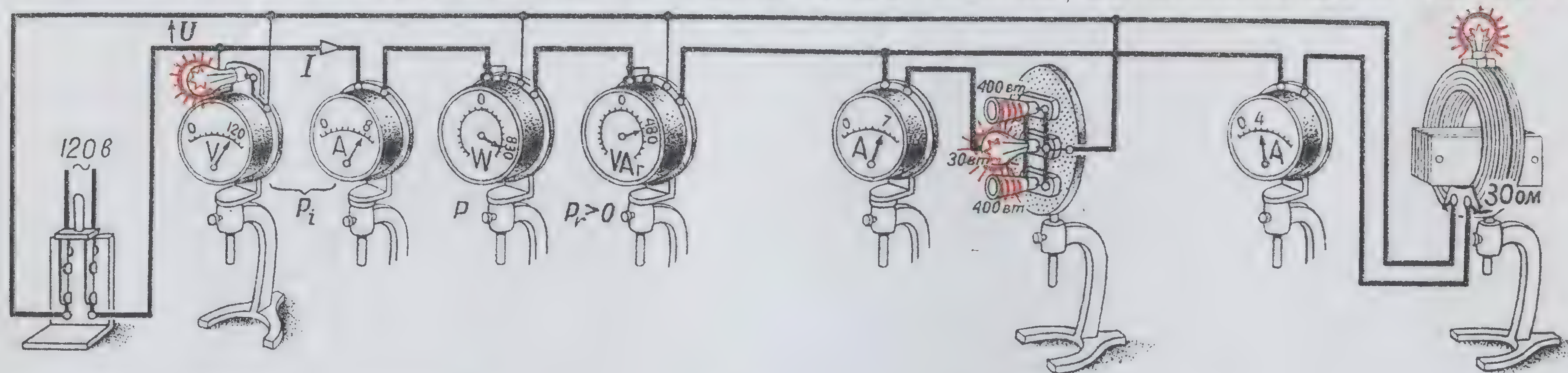
$$Z=\sqrt{(\Sigma R)^2+(\Sigma X)^2}\ ом$$

В последовательной цепи напряжения и сопротивления складываются ГЕОМЕТРИЧЕСКИ

Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНДУКТИВНОСТИ



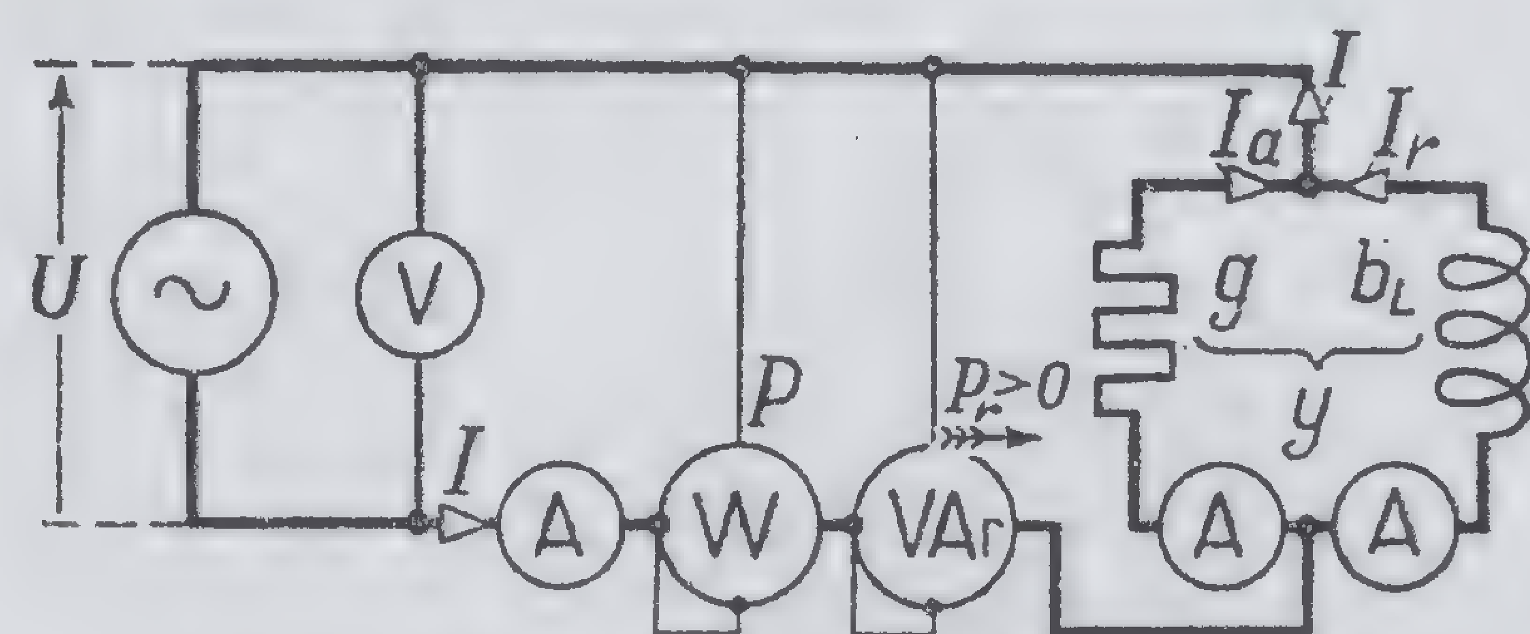
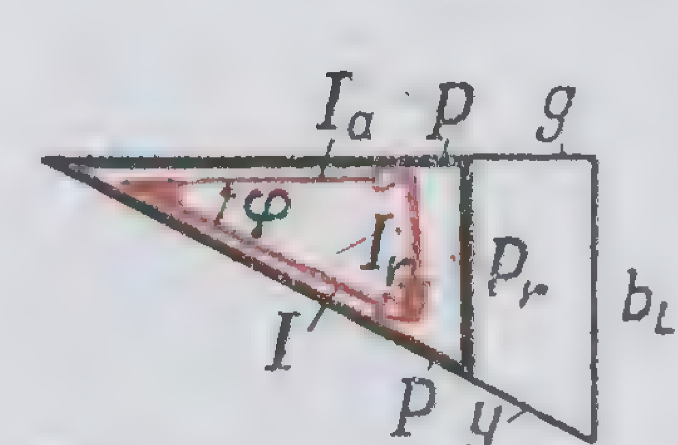
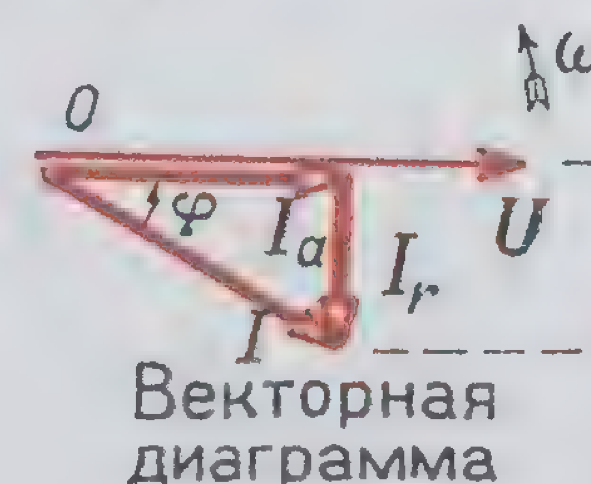


Схема соединений

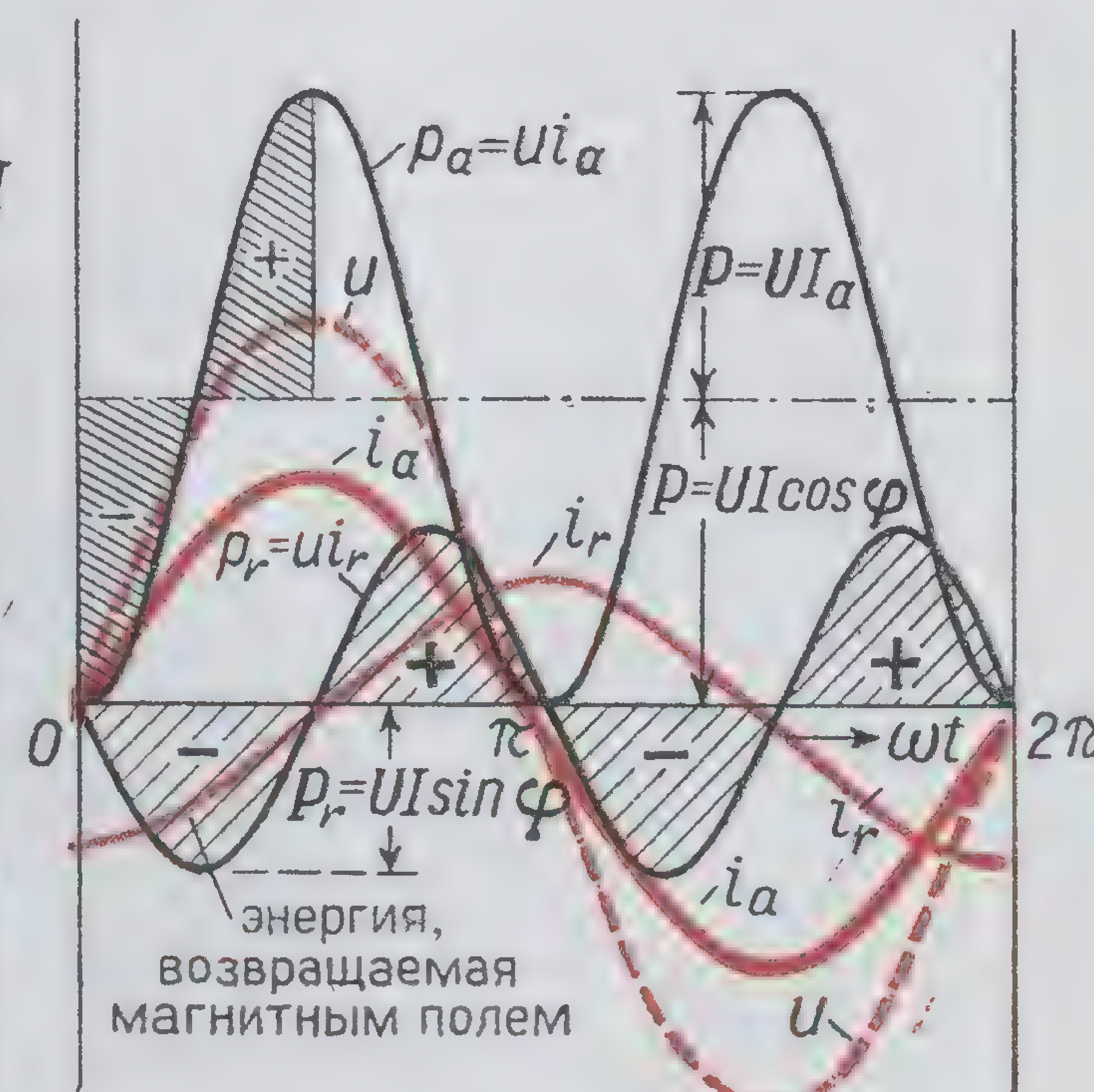


Подобные треугольники токов, проводимостей и мощностей



Векторная диаграмма





Общий ток ОТСТАЕТ по фазе от напряжения на угол φ

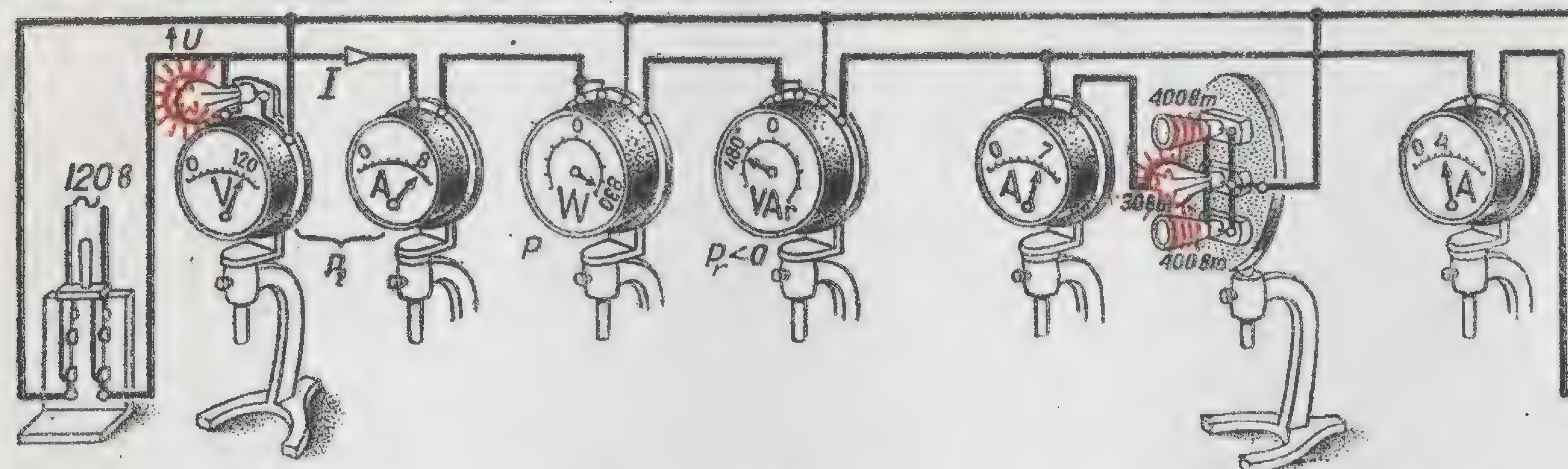
Кривые напряжения, тока и общей мощности

Кривые активных и реактивных слагающих тока и мощности

Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ



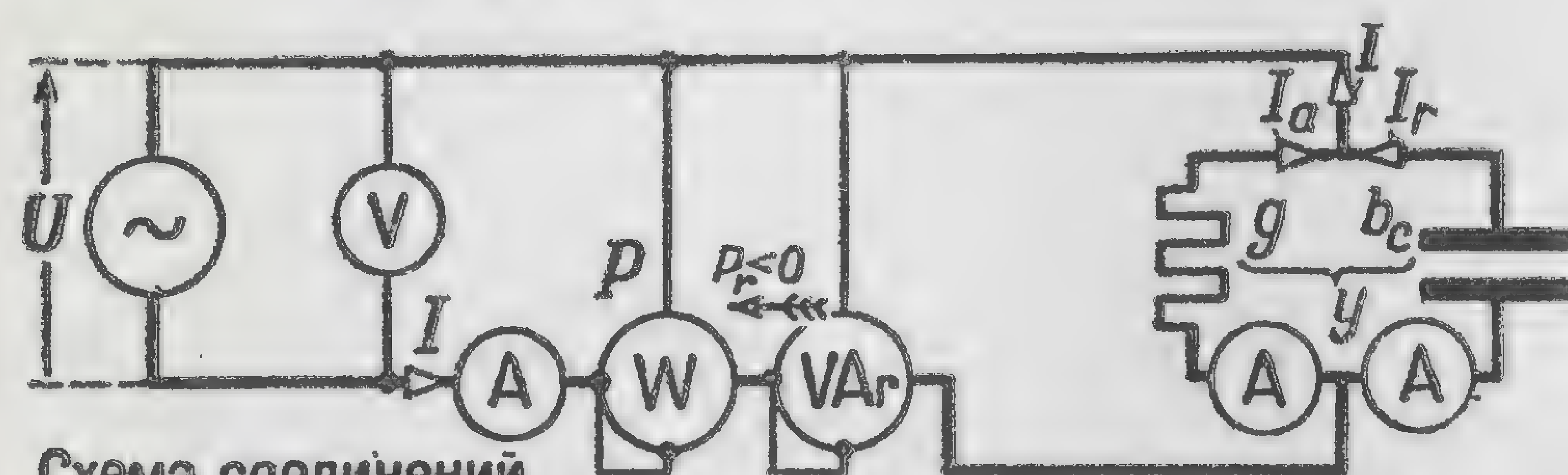
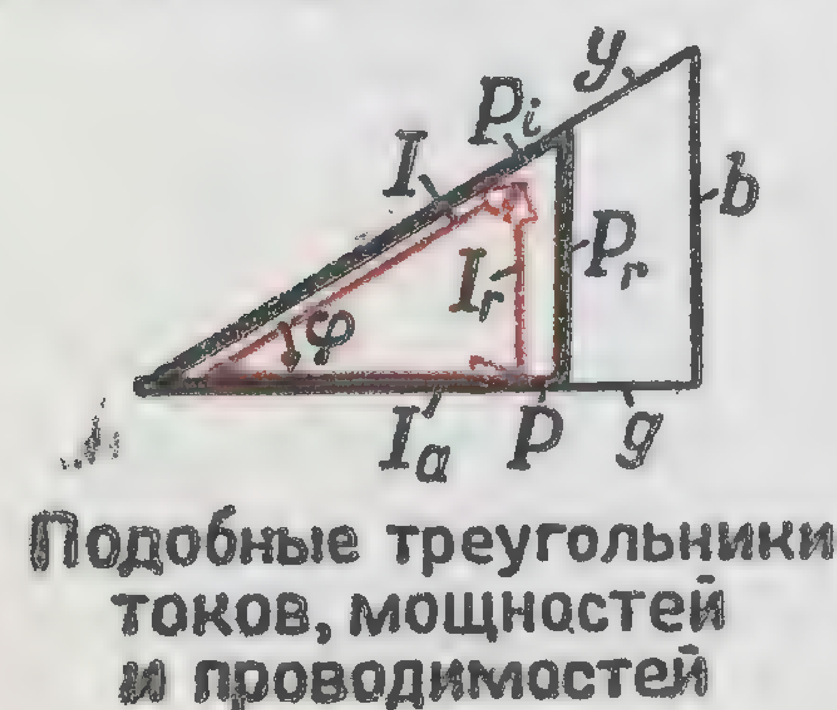
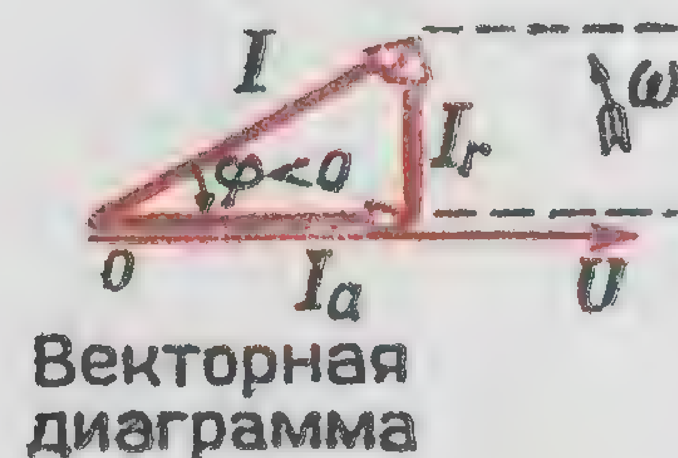


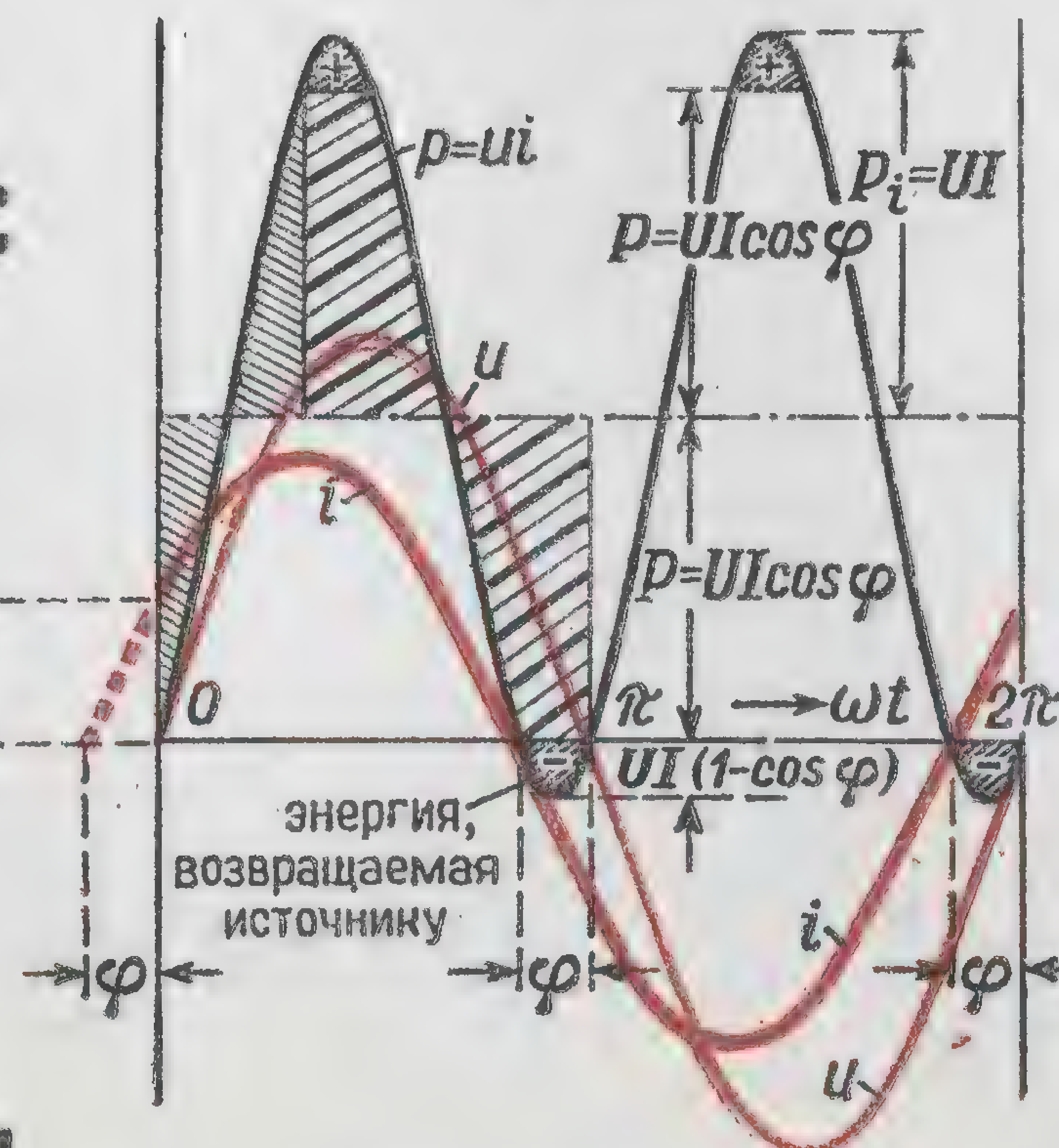
Схема соединений



Подобные треугольники токов, мощностей и проводимостей



Векторная диаграмма



Кривые напряжения, тока и общей мощности

Общий ток опережает напряжение по фазе на угол φ

Токи

активный	$I_a = I\cos\varphi = Ug$	
реактивный	$I_r = I\sin\varphi = Ub$	а
общий	$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = Uy$	

Проводимости

активная	$g = y\cos\varphi = I_a/U$	
реактивная	$b = y\sin\varphi = I_r/U$	$\frac{1}{ом}$
полная	$y = \sqrt{g^2 + b^2} = I/U$	

Мощности

активная	$P = UI\cos\varphi = UI_a = U^2 g$	вт
реактивная	$P_r = UI\sin\varphi = UI_r = U^2 b$	вар
кажущаяся	$P_i = UI = \sqrt{P^2 + P_r^2} = U^2 y$	ва

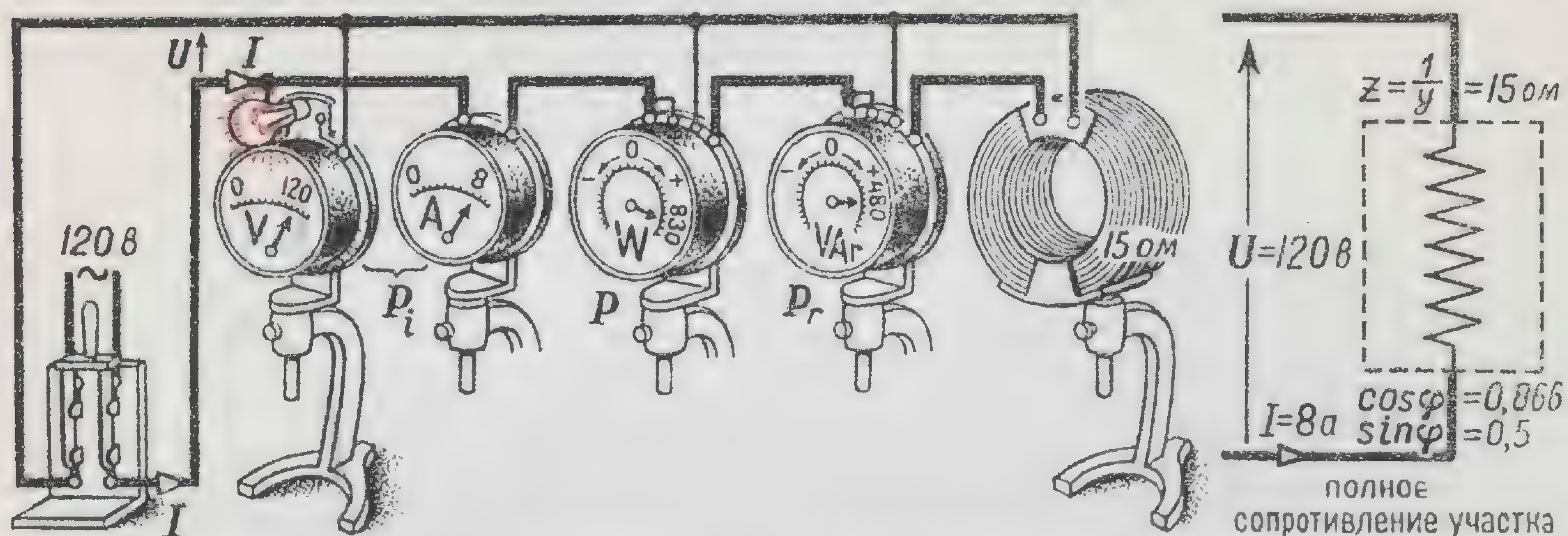
Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P/UI = I_a/I = g/y$$

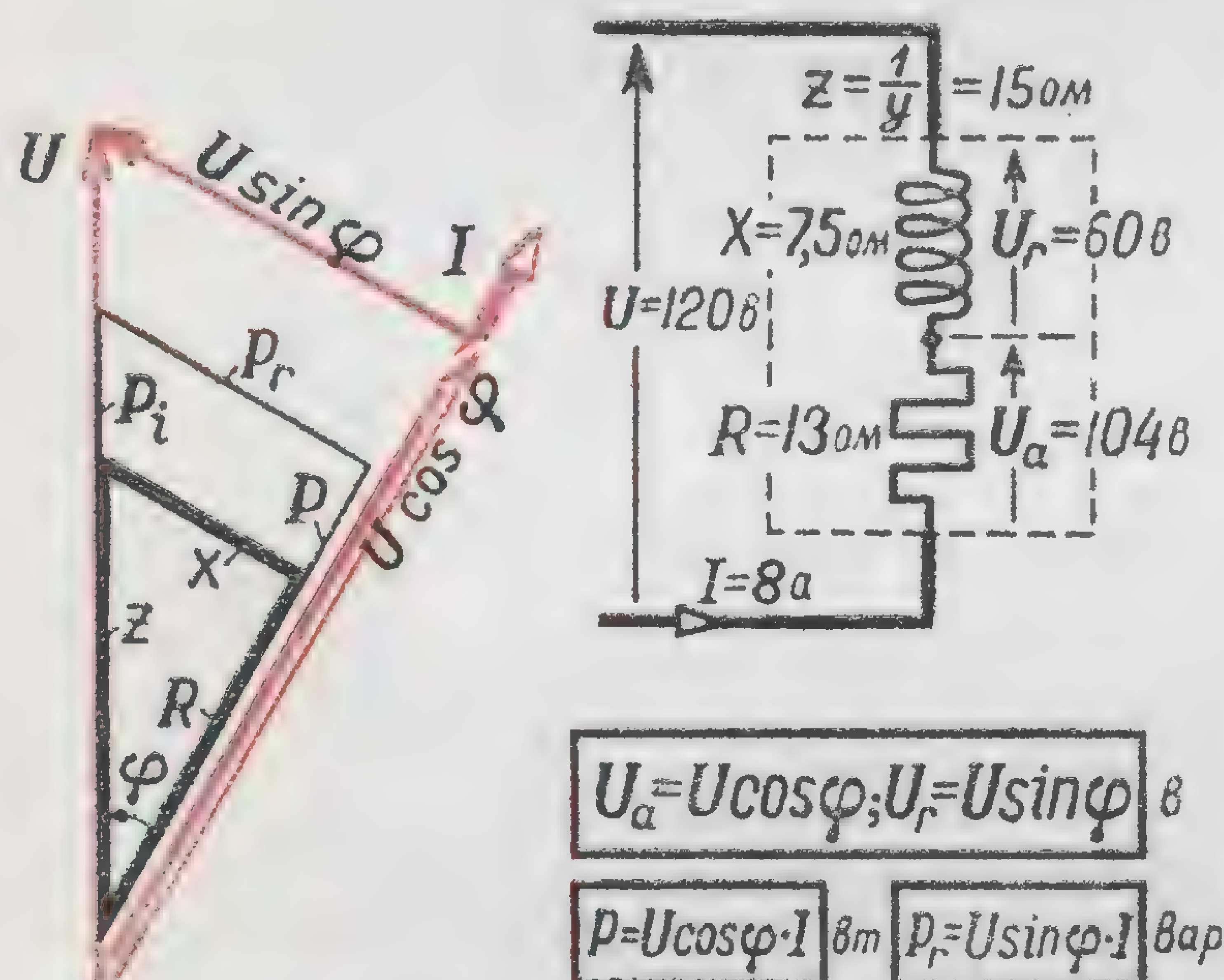
Э.И. Расовский

Худ. А.Меньшиков

АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ СЛАГАЮЩИЕ ОБЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ ТОКА.



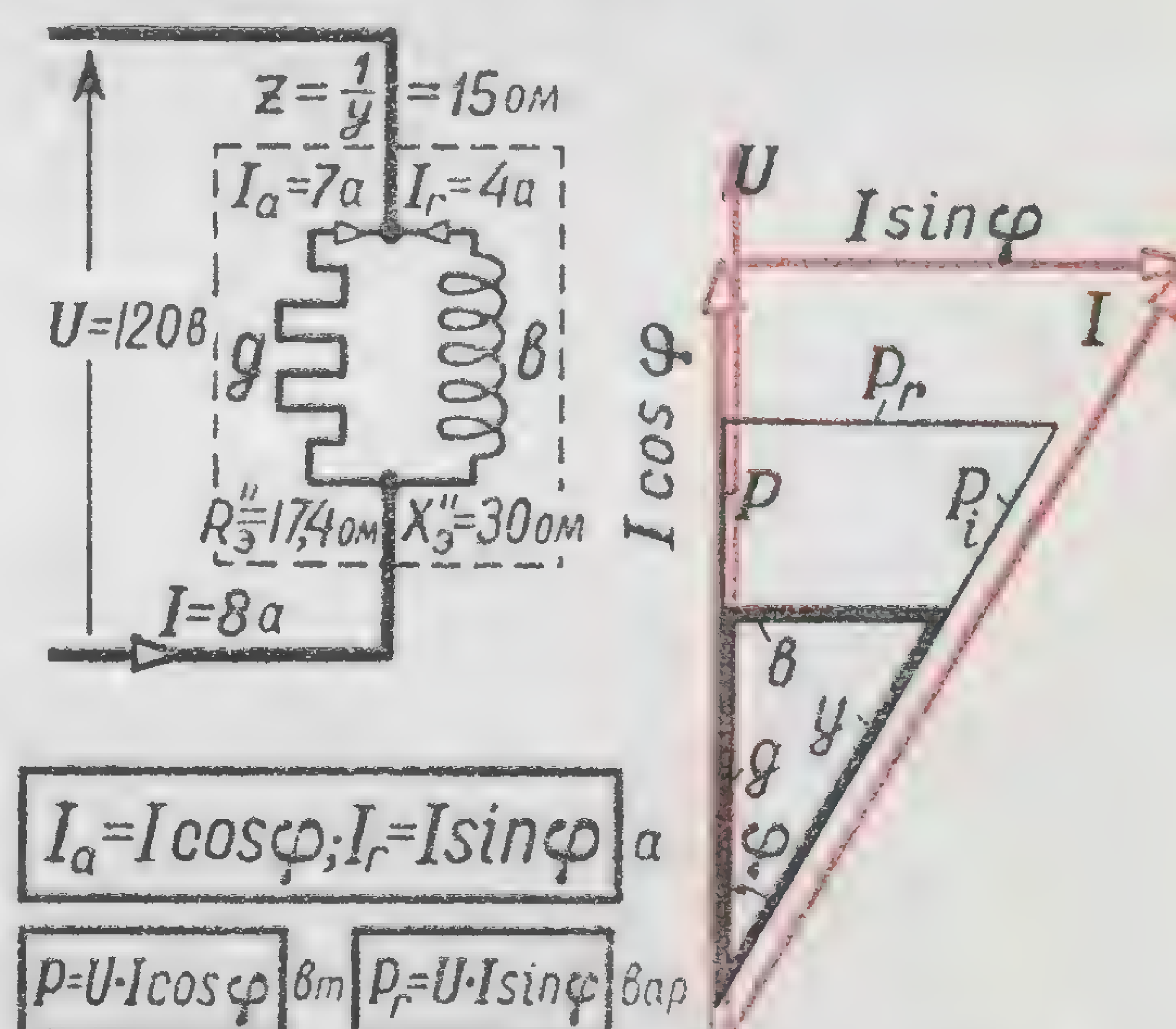
Участок цепи переменного тока



$U_a = U\cos\varphi;\ U_r = U\sin\varphi$ в

$P = U\cos\varphi\cdot I$ вт $P_r = U\sin\varphi\cdot I$ вар

Разложение общего напряжения на активную и реактивную слагающие



$I_a = I\cos\varphi;\ I_r = I\sin\varphi$ а

$P = U\cdot I\cos\varphi$ вт $P_r = U\cdot I\sin\varphi$ вар

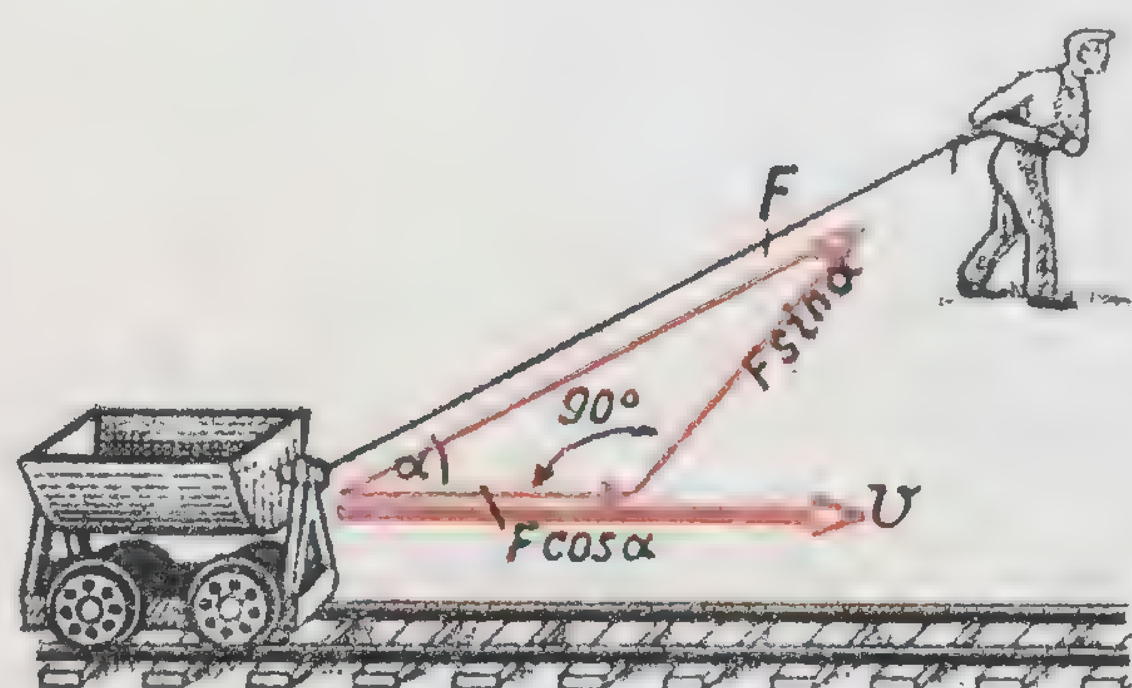
Разложение общего тока на активную и реактивную слагающие

$$y=\frac{1}{z};\ g=\frac{R}{z^2};\ в=\frac{X}{z^2}\ \frac{1}{ом}$$

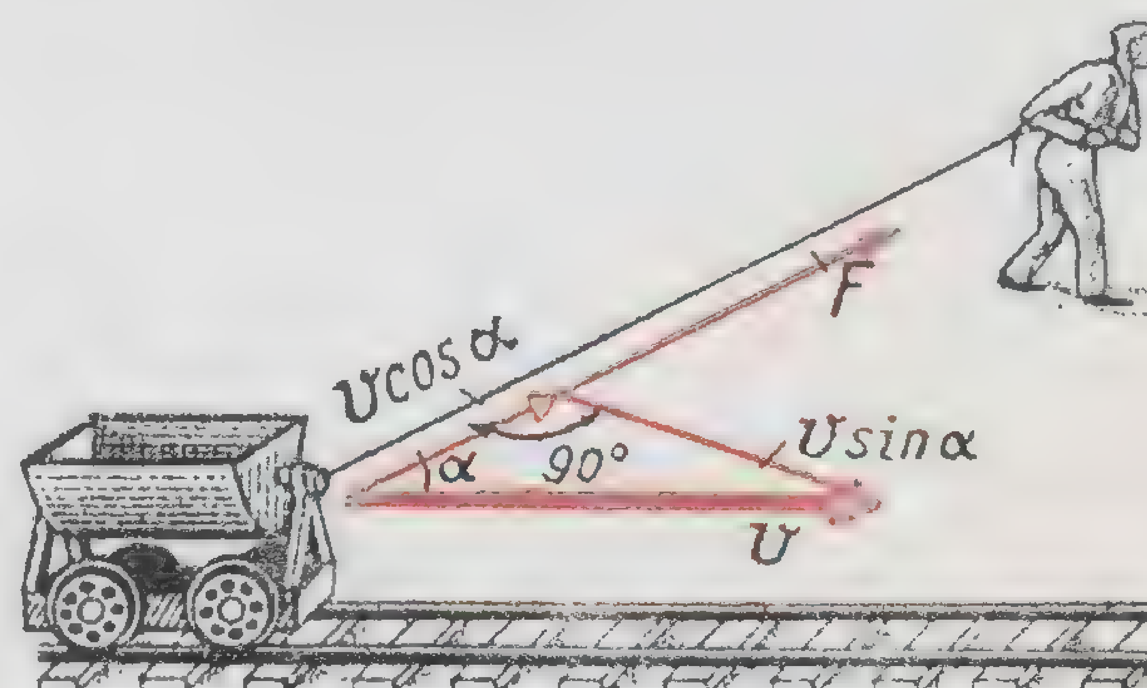
$$\frac{1}{g}=R_э''=\frac{R}{\cos^2\varphi};\ \frac{1}{в}=X_э''=\frac{X}{\sin^2\varphi}\ ом$$

$$z=\frac{1}{y};\ R=\frac{g}{y^2};\ X=\frac{в}{y^2}\ ом$$

Соотношения между сопротивлениями и проводимостями участка цепи при определённой частоте



$P_{мех} = F\cos\alpha\cdot\upsilon = F_\upsilon\cdot\upsilon$ вт



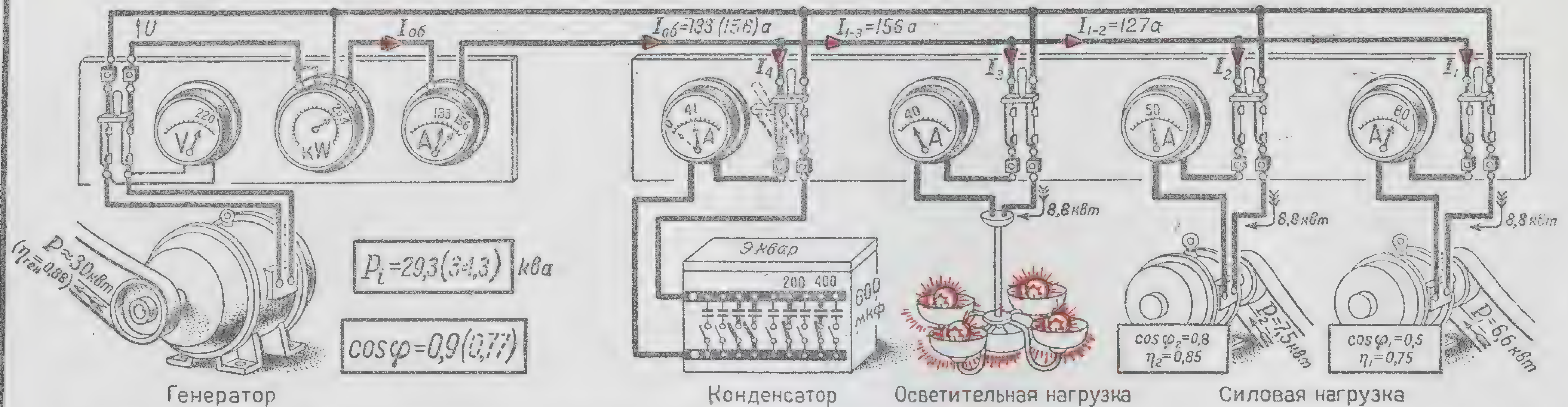
$P_{мех} = F\cdot\upsilon\cos\alpha = F\cdot\upsilon_F$ вт

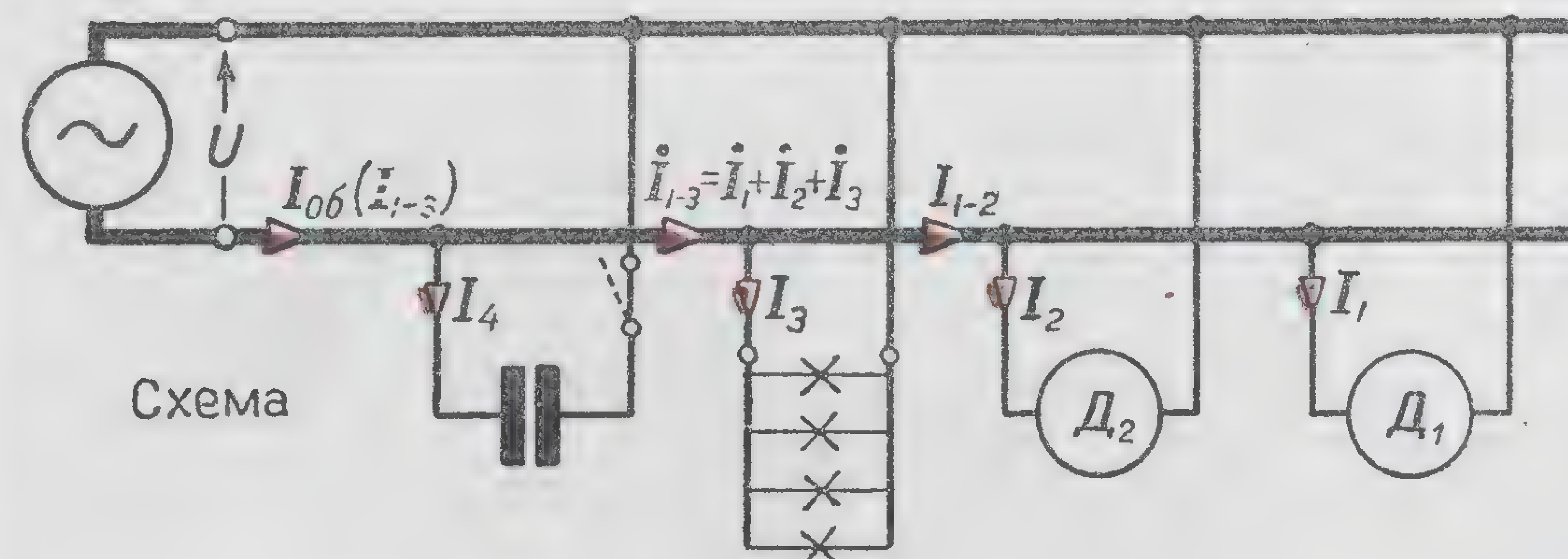
Механическая мощность (аналогия)

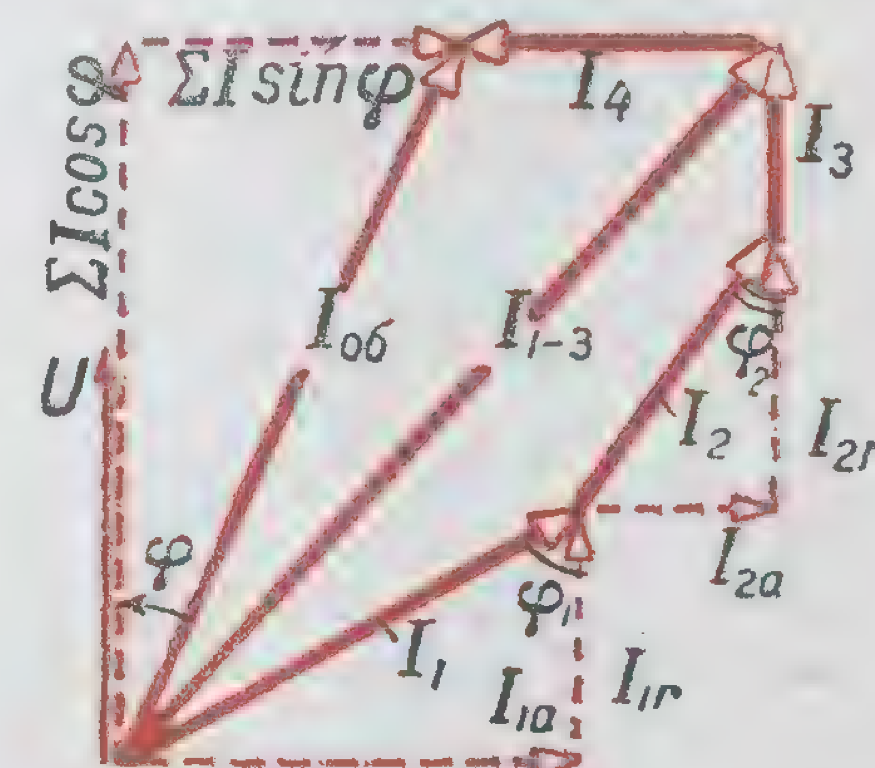
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшяков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА







$P=UI\cos\varphi$ вт $P_r=UI\sin\varphi$ вар

Активная и реактивная мощности отдельного потребителя

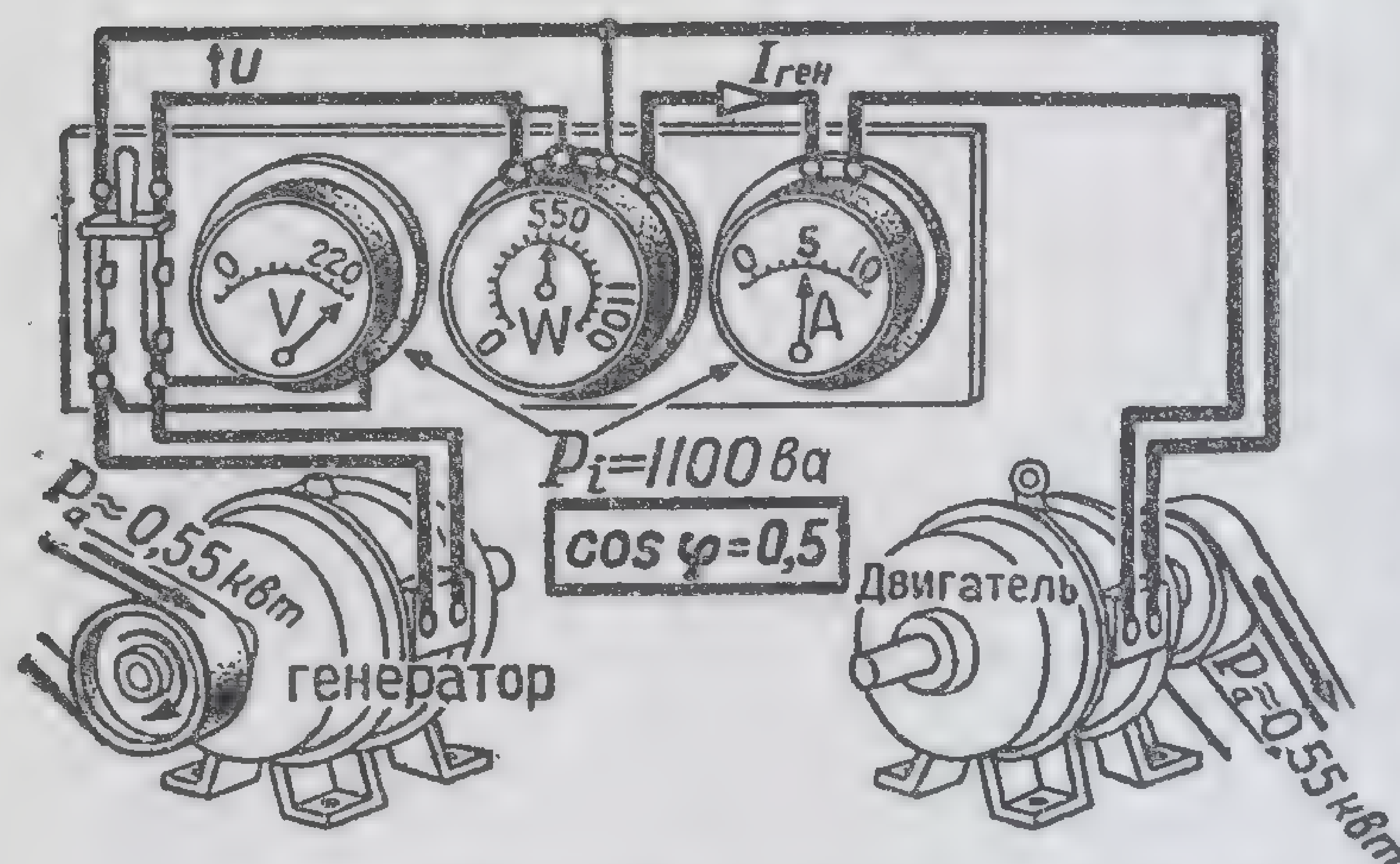
$P=\Sigma UI\cos\varphi$ вт $P_r=\Sigma UI\sin(\pm\varphi)$ вар $I=\sqrt{(\Sigma I\cos\varphi)^2+(\Sigma I\sin\varphi)^2}$ а $P_i=UI=\sqrt{P^2+P_r^2}$ ва $\cos\varphi=\frac{P}{UI}$

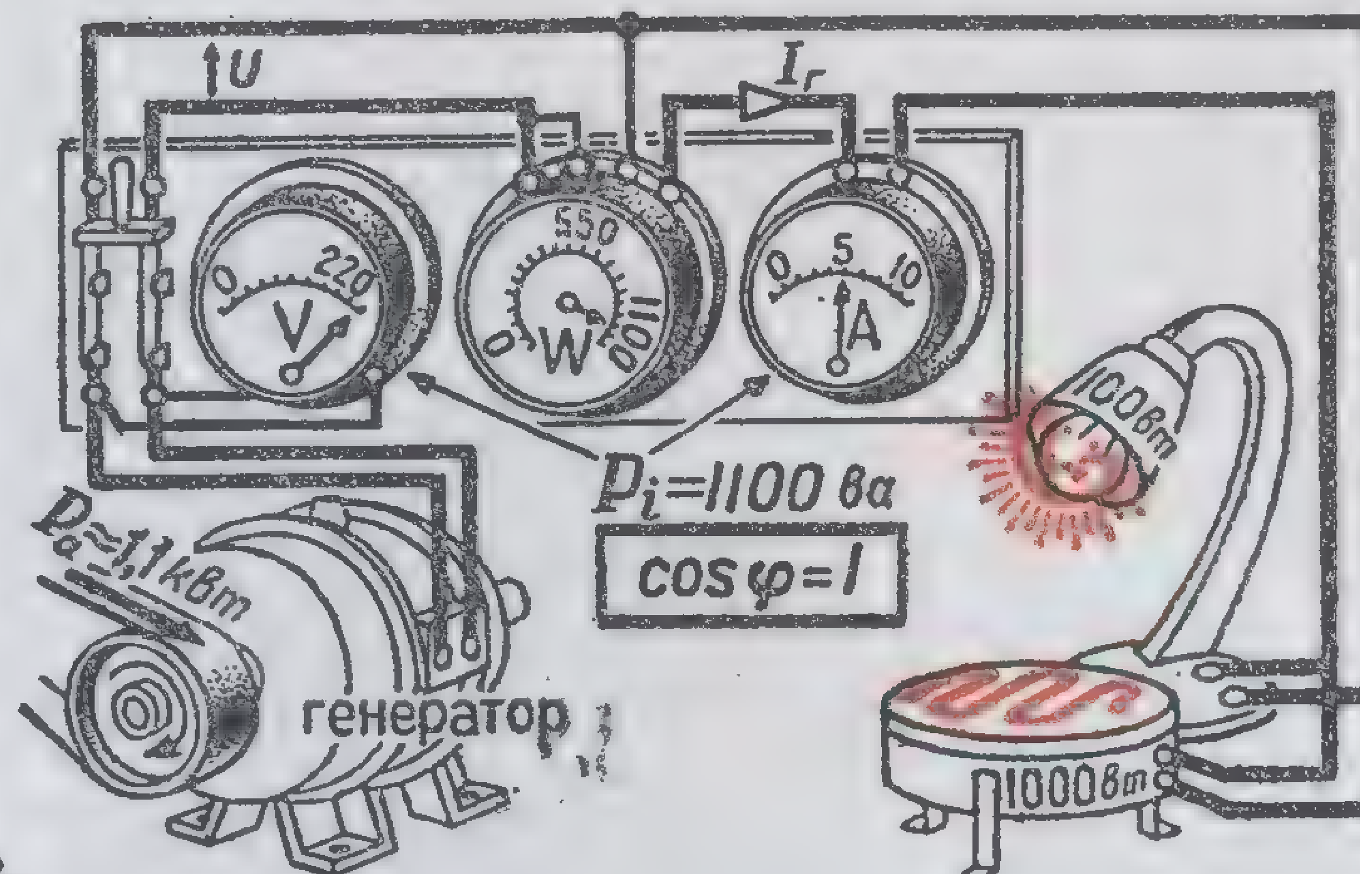
Активные мощности потребителей складываются **арифметически**, реактивные мощности — **алгебраически**. Токи и кажущиеся мощности складываются **геометрически**

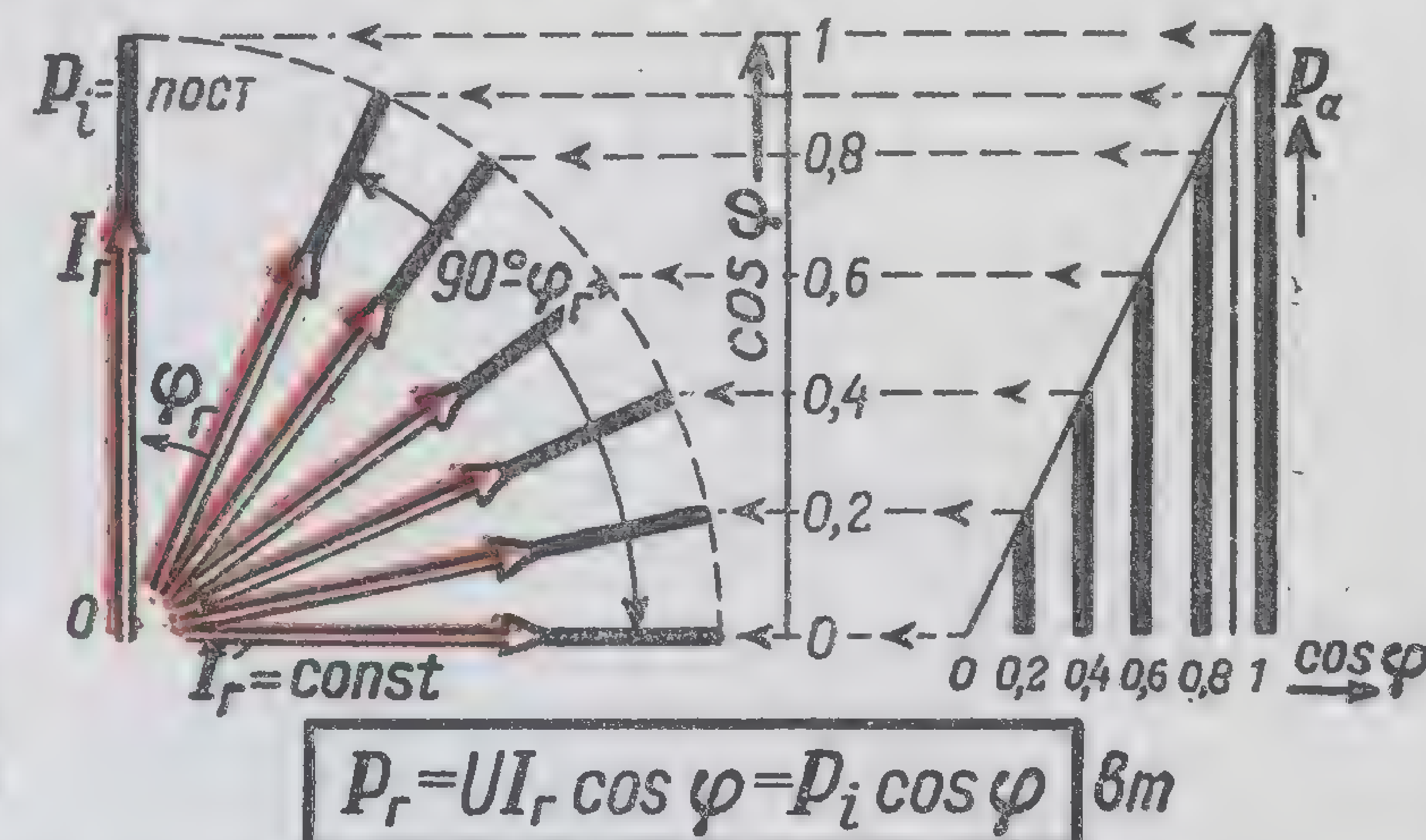
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ($\cos\varphi$)

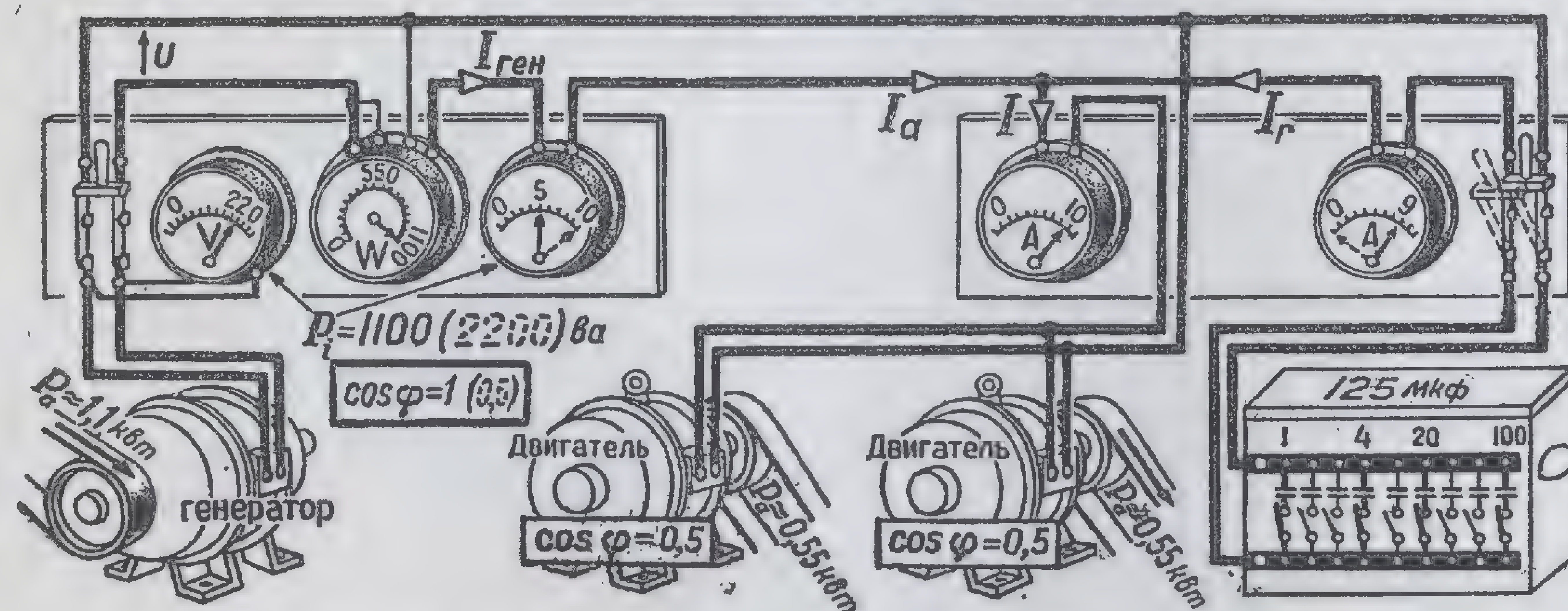


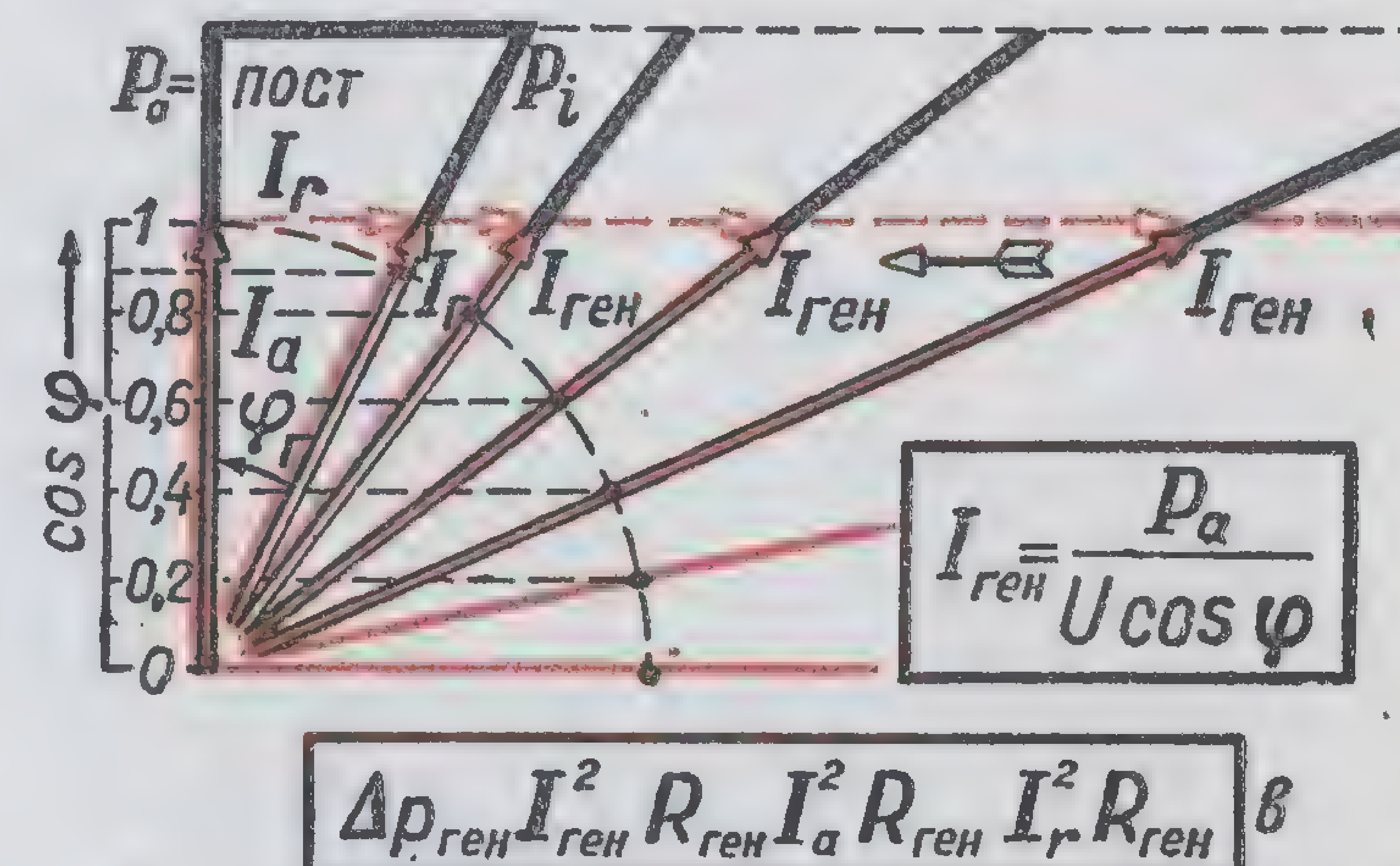




$P_r = UI_r \cos\varphi = P_i \cos\varphi$ вт

Повышение $\cos\varphi$ при одном и том же токе нагрузки ведет к возрастанию отдаваемой активной мощности (к загрузке первичного двигателя)





$I_{ген} = \dfrac{P_a}{U\cos\varphi}$

$\Delta p_{ген} I^2_{ген} R_{ген} I^2_a R_{ген} I^2_r R_{ген}$ в

Нагрев обмотки генератора обусловлен как активным, так и реактивным током нагрузки

Повышение $\cos\varphi$ при одной и той же отдаваемой активной мощности ведет к уменьшению тока генератора (к уменьшению потерь и к возможности подключения дополнительной нагрузки, т.е. к лучшему использованию мощности первичного двигателя)

$P_i = UI$ ва
Кажущаяся мощность — мера электромагнитной нагрузки машины

$P_a = UI\cos\varphi$ вт
Активная мощность — мера механической нагрузки машины

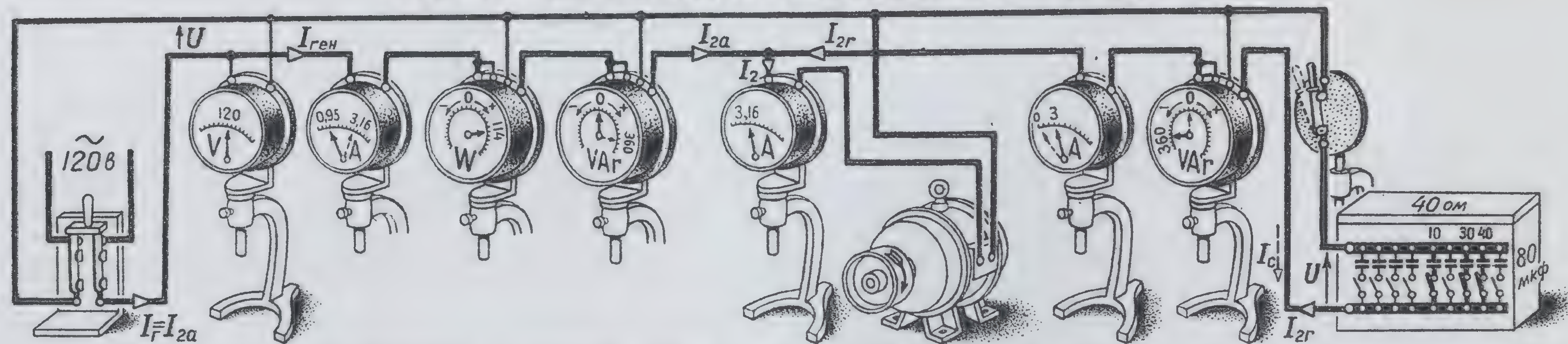
$P_r = UI\sin\varphi$ вар
Реактивная мощность — мера энергии, колеблющейся в цепи

$\cos\varphi = P/UI$
Коэффициент мощности — показатель использования мощности генератора

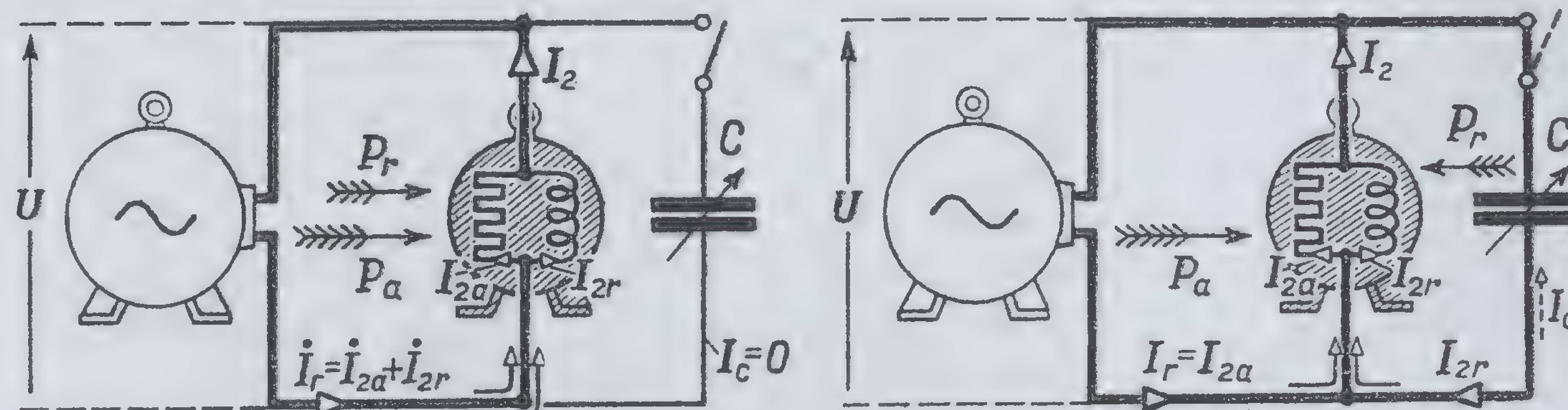
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

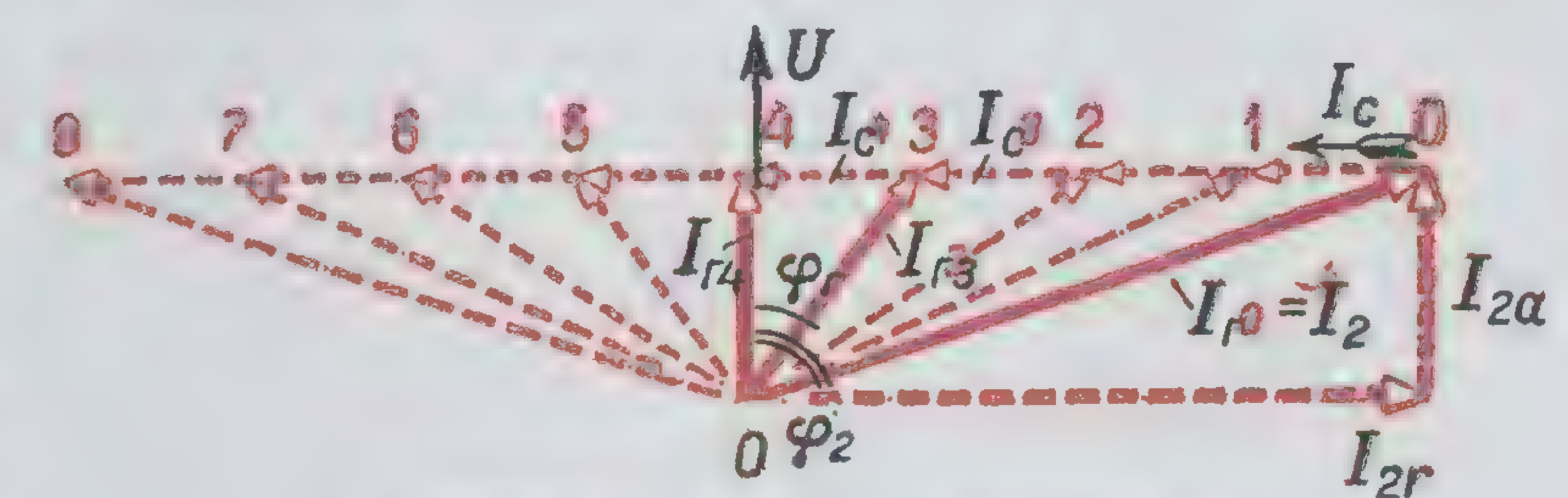
КОМПЕНСАЦИЯ СДВИГА ФАЗ



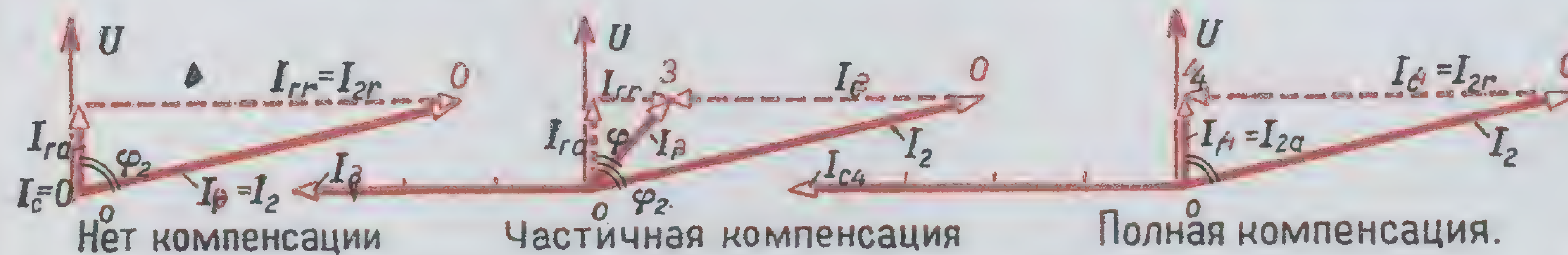
Параллельное соединение двигателя и конденсатора переменной емкости



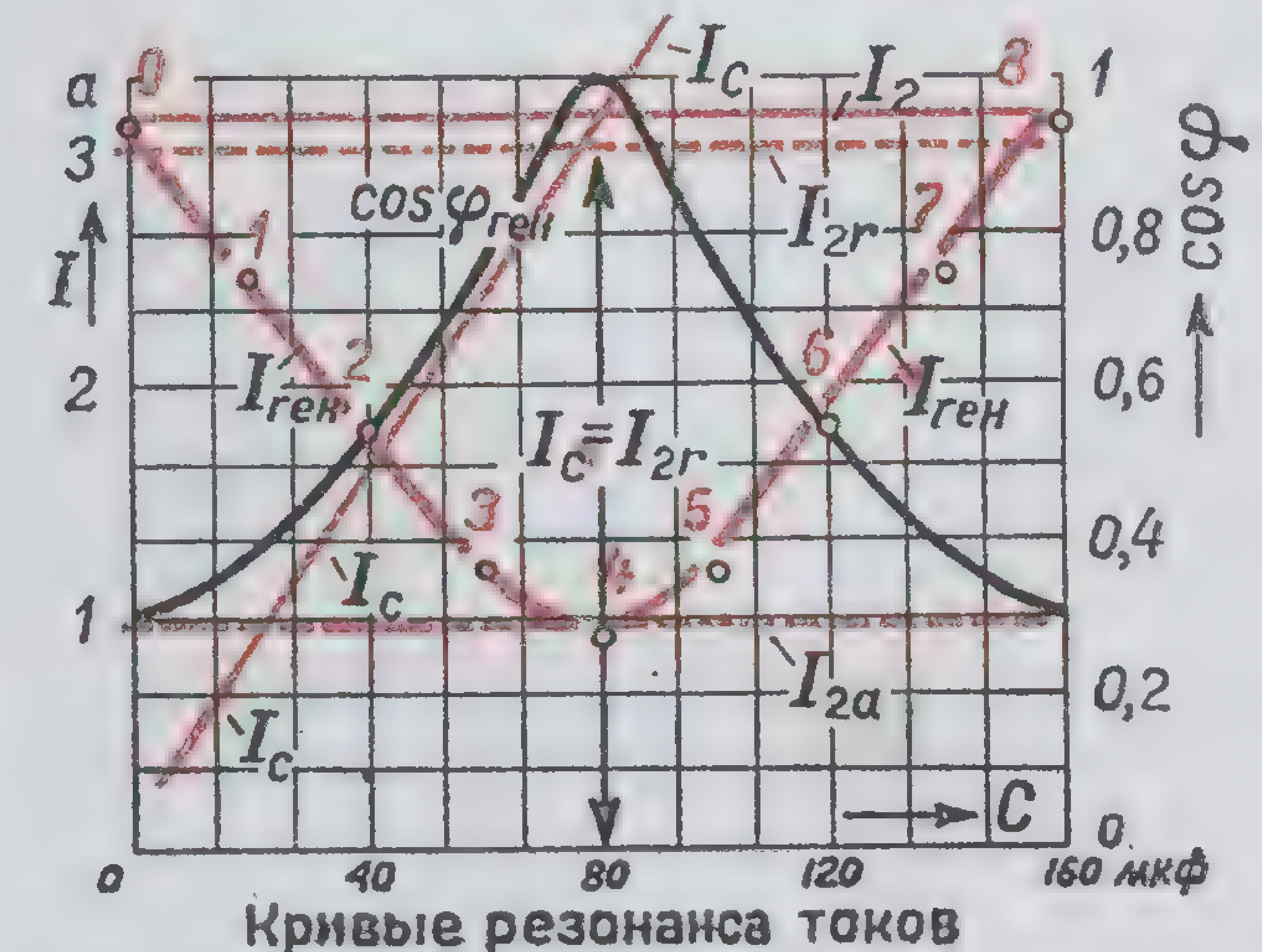
Нет компенсации   Полная компенсация



Изменение тока генератора при возрастании емкостного тока



Нет компенсации   Частичная компенсация   Полная компенсация.



$$I_c = U\omega C = I_{2a}(tg\varphi_2 - tg\varphi_г)$$

Условие частичной компенсации

$$\cos\varphi_{ген} = 1;\quad I_c = U\omega C = I_{2r}$$

Условие полной компенсации

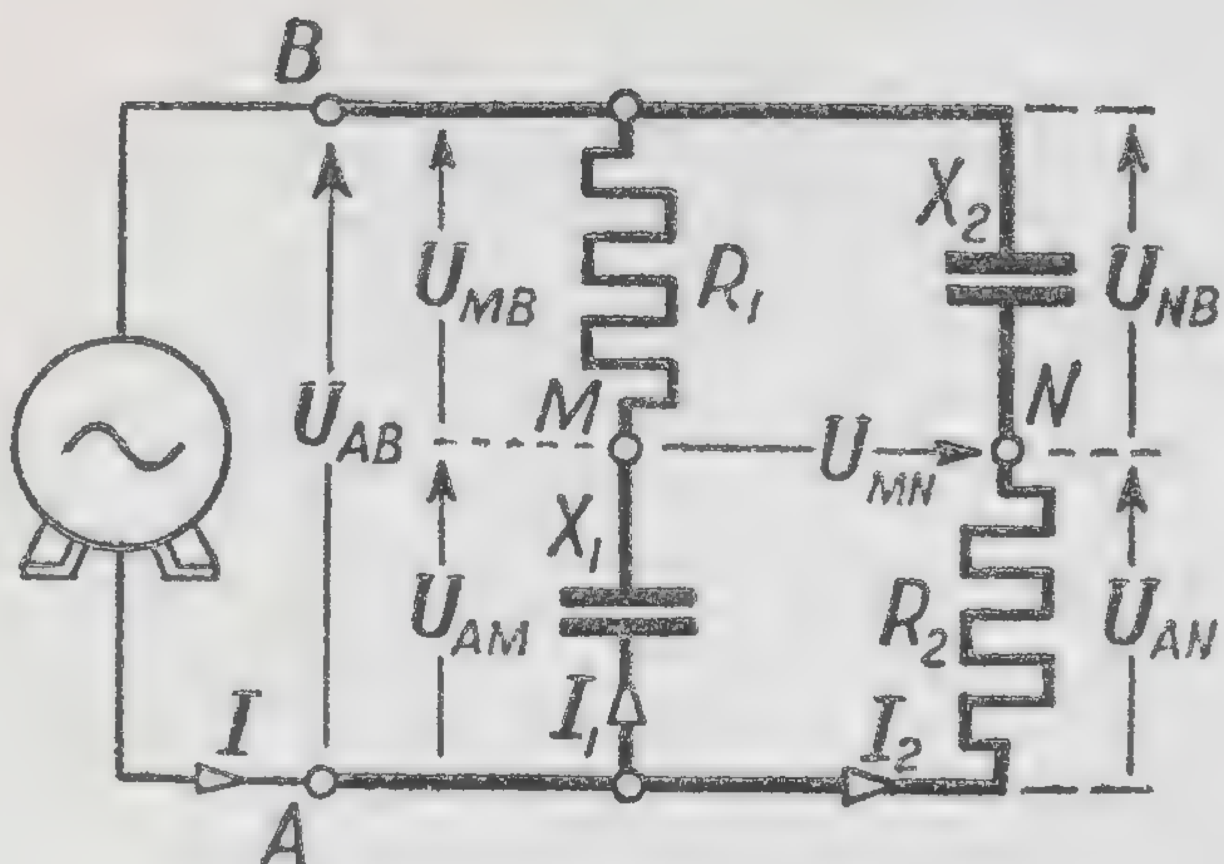
Кривые резонанса токов

Компенсация сдвига фаз достигается подключением статических конденсаторов или синхронных компенсаторов (см. часть II)

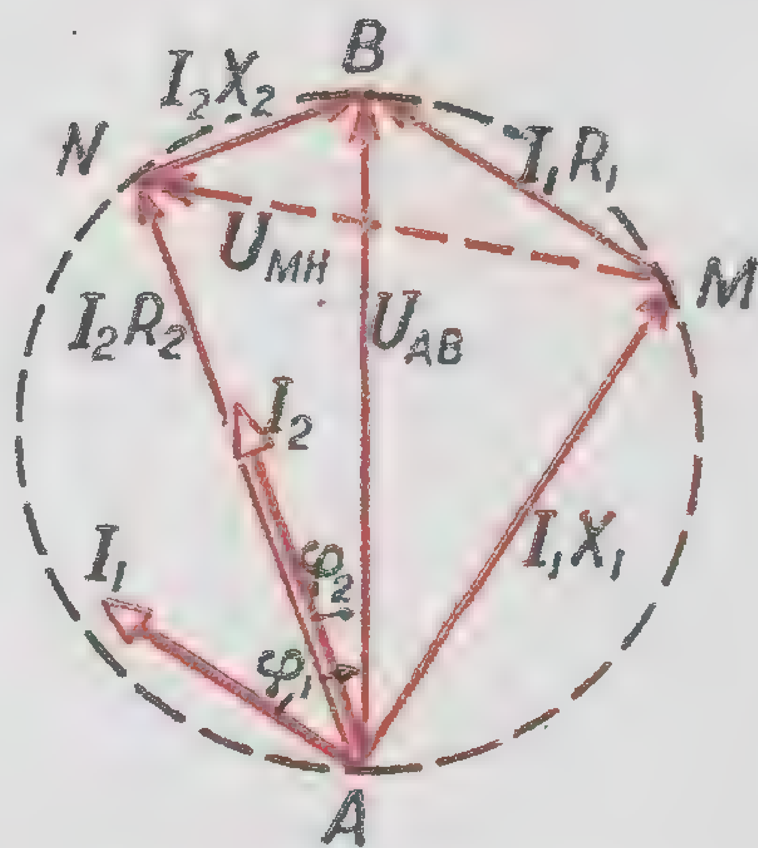
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

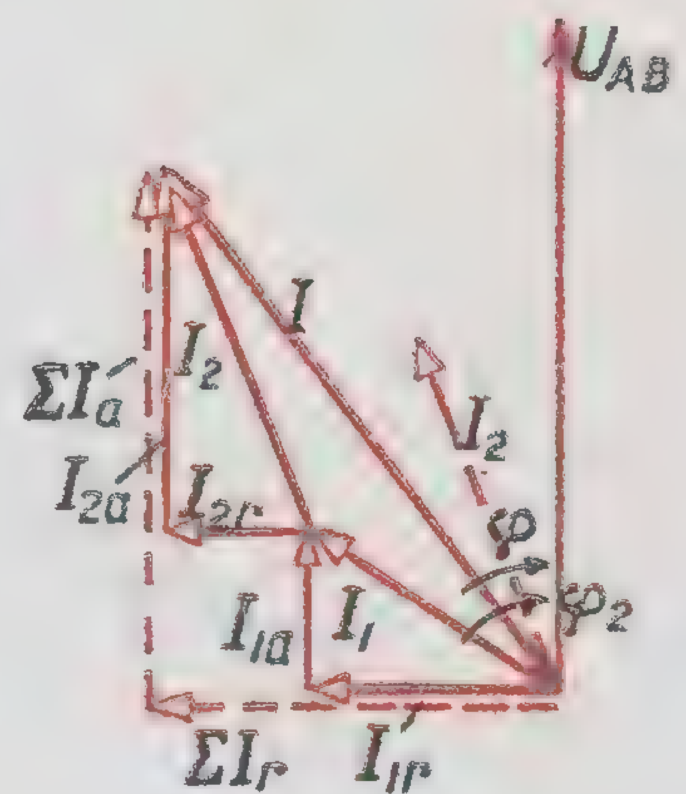
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



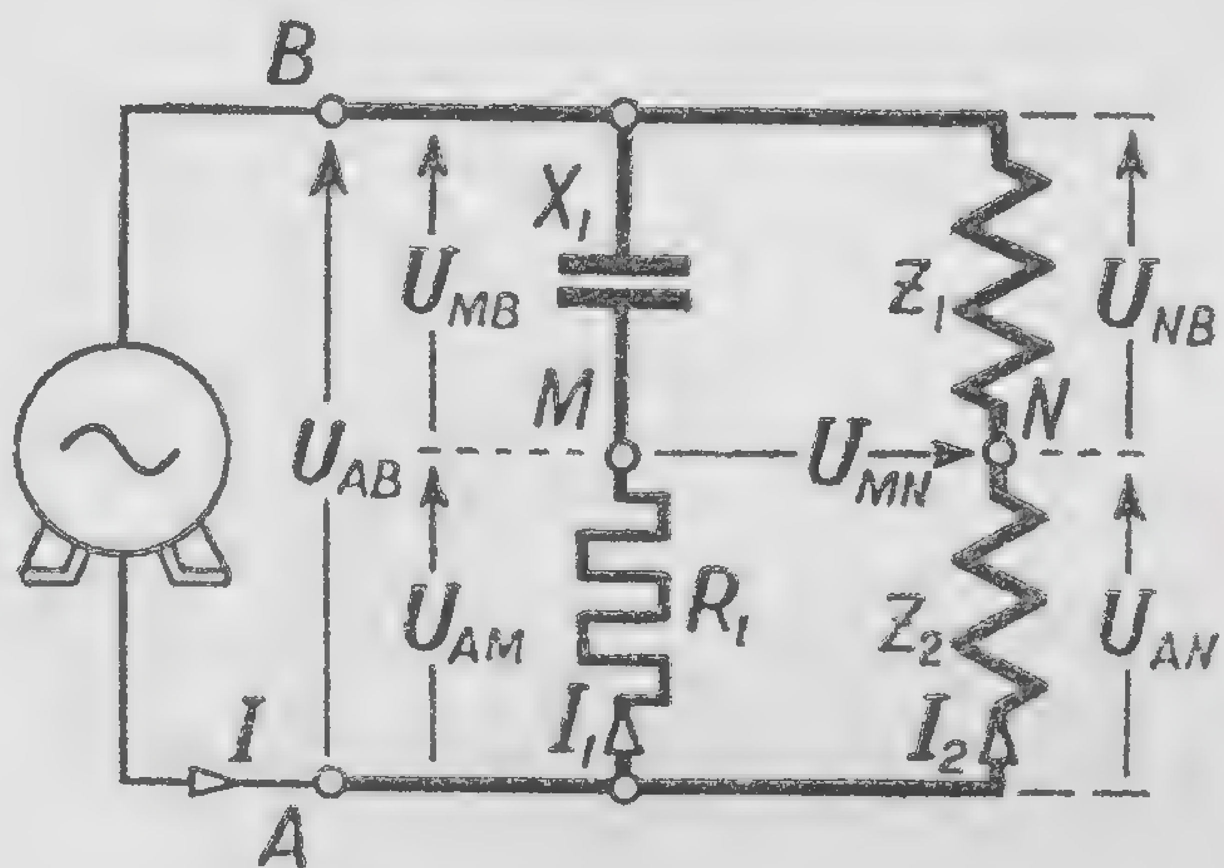
Параллельное соединение двух цепей



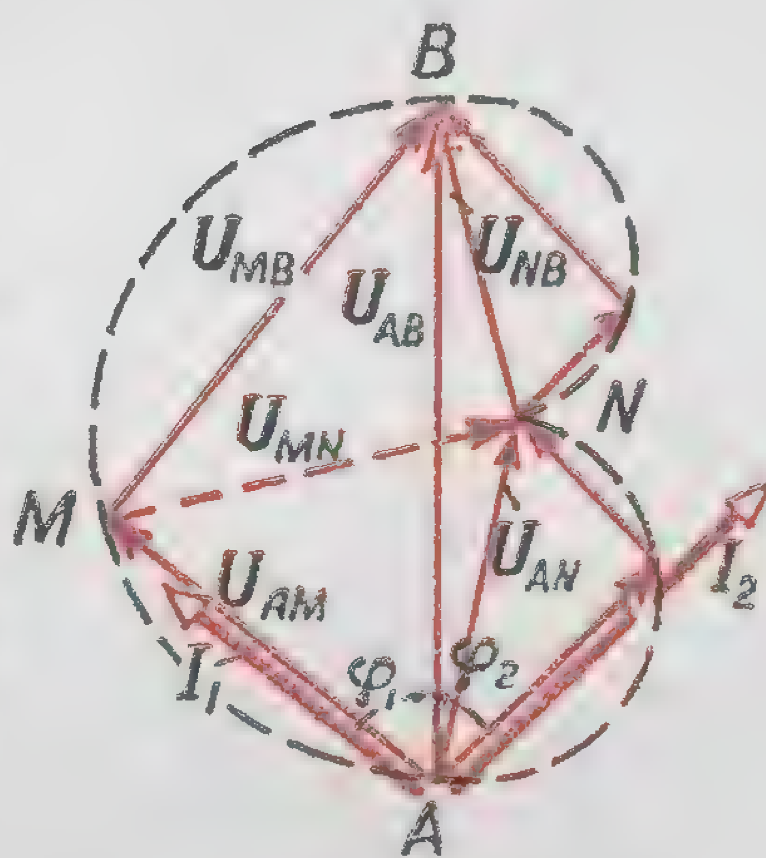
Топографическая векторная диаграмма



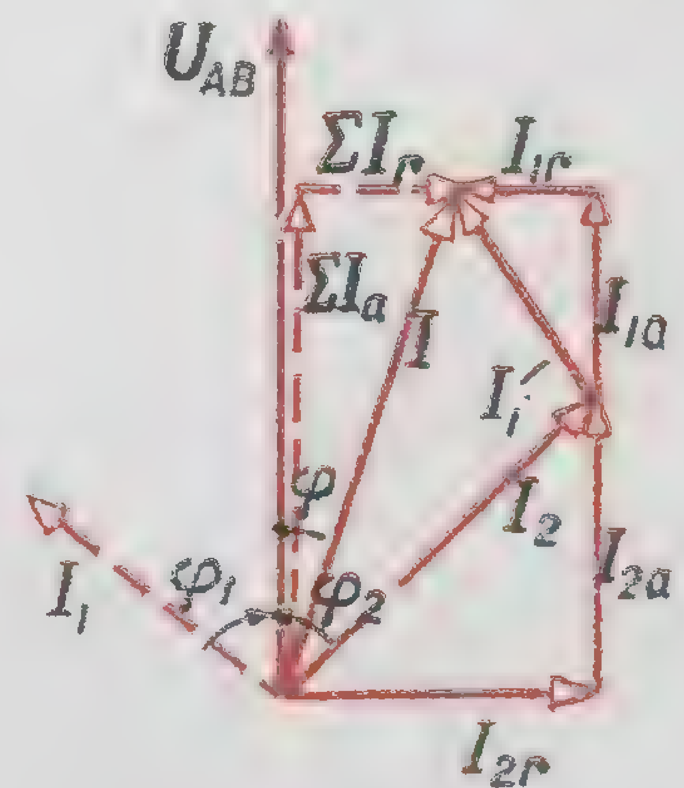
Геометрическое сложение токов



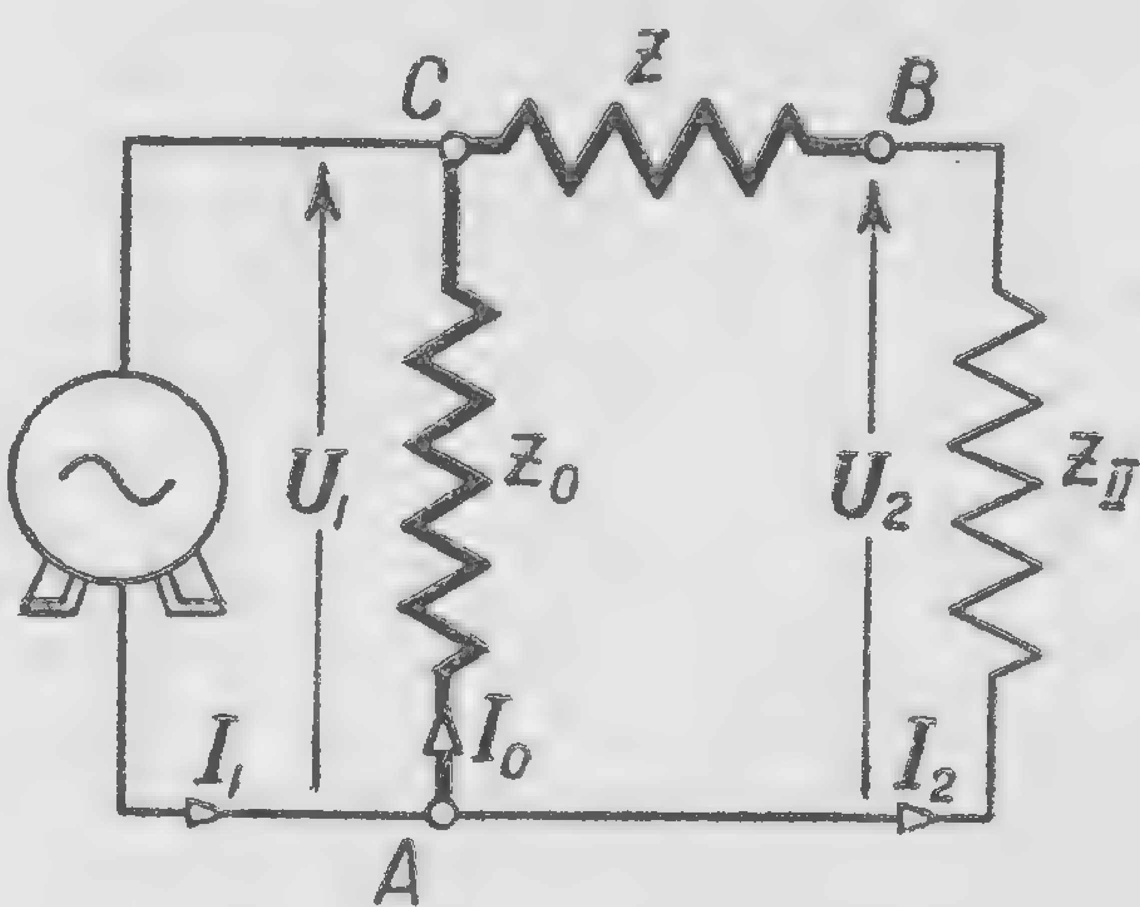
Параллельные ветви с емкостью и индуктивностью



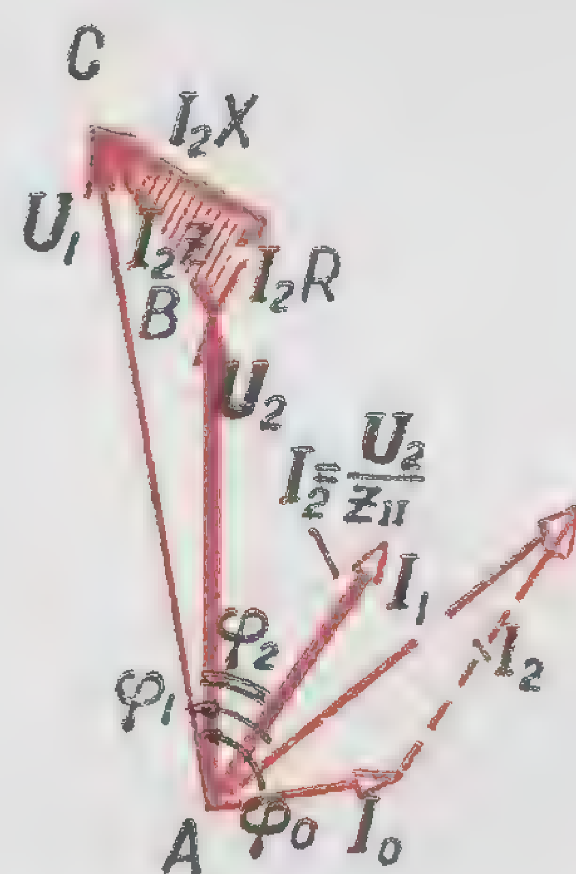
Топографическая векторная диаграмма



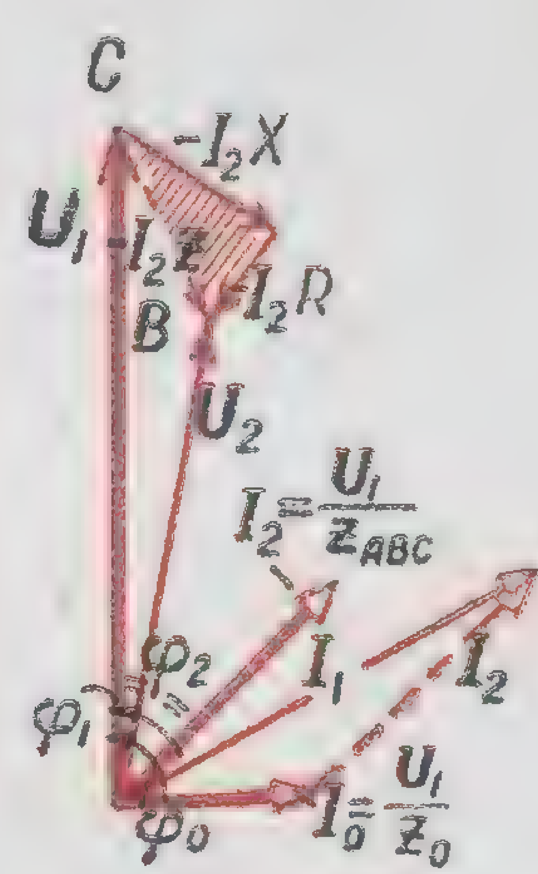
Геометрическое сложение токов



Г-образная схема



а Векторная диаграмма при заданном U_2



б Векторная диаграмма при заданном U_1

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}_3+\cdots \quad a$$

$$I=\sqrt{(\Sigma I_a)^2+(\Sigma I_r)^2} \quad a$$

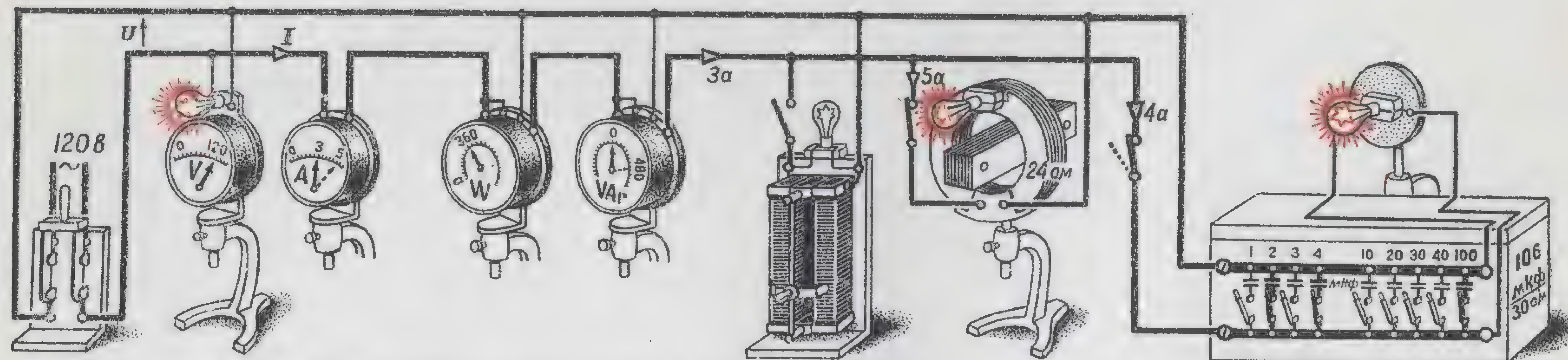
$$\cos\varphi=\frac{\Sigma I_a}{I}$$

Токи параллельных ветвей складываются ГЕОМЕТРИЧЕСКИ

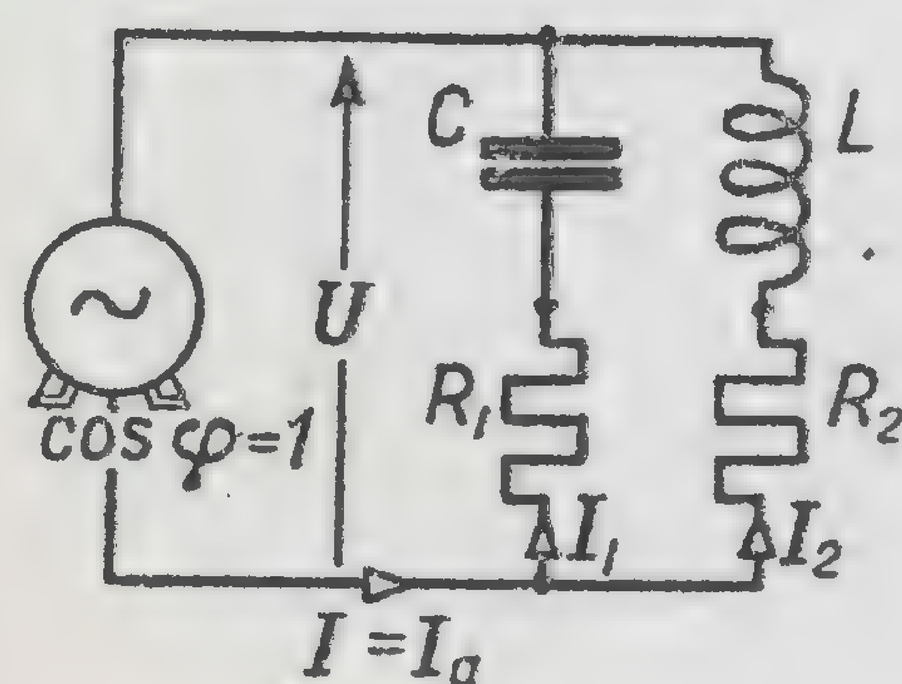
З.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

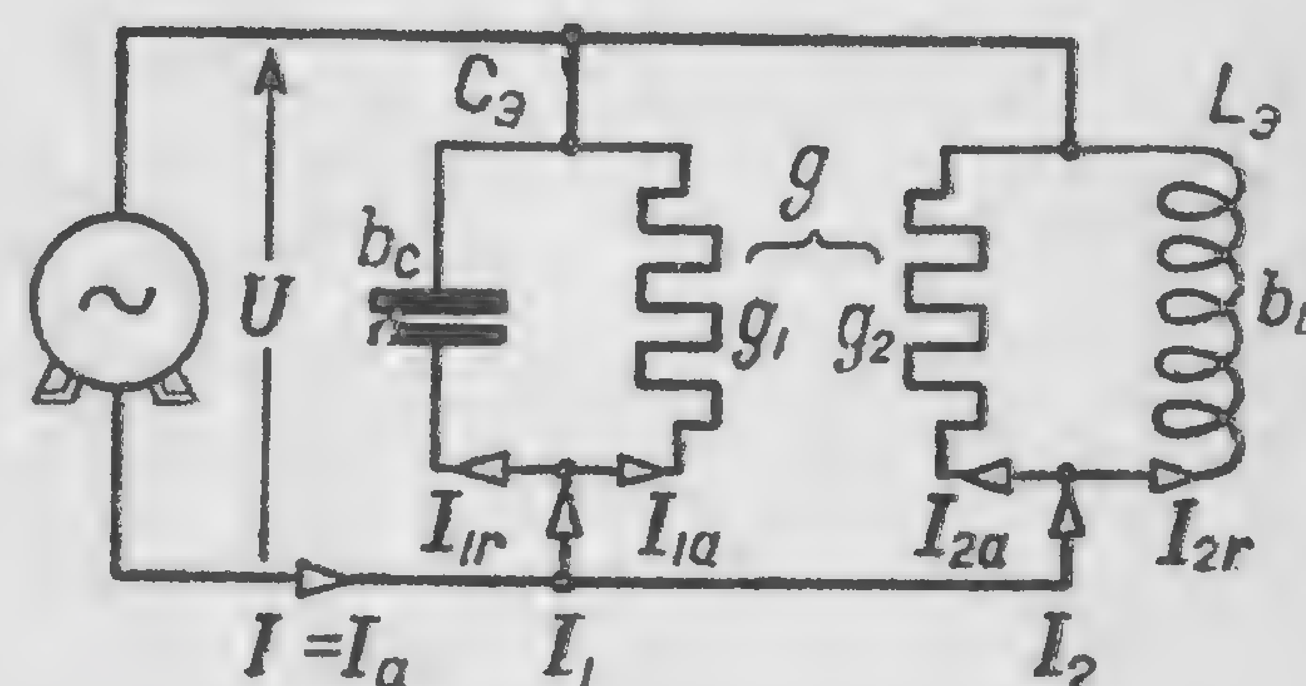
РЕЗОНАНС ТОКОВ



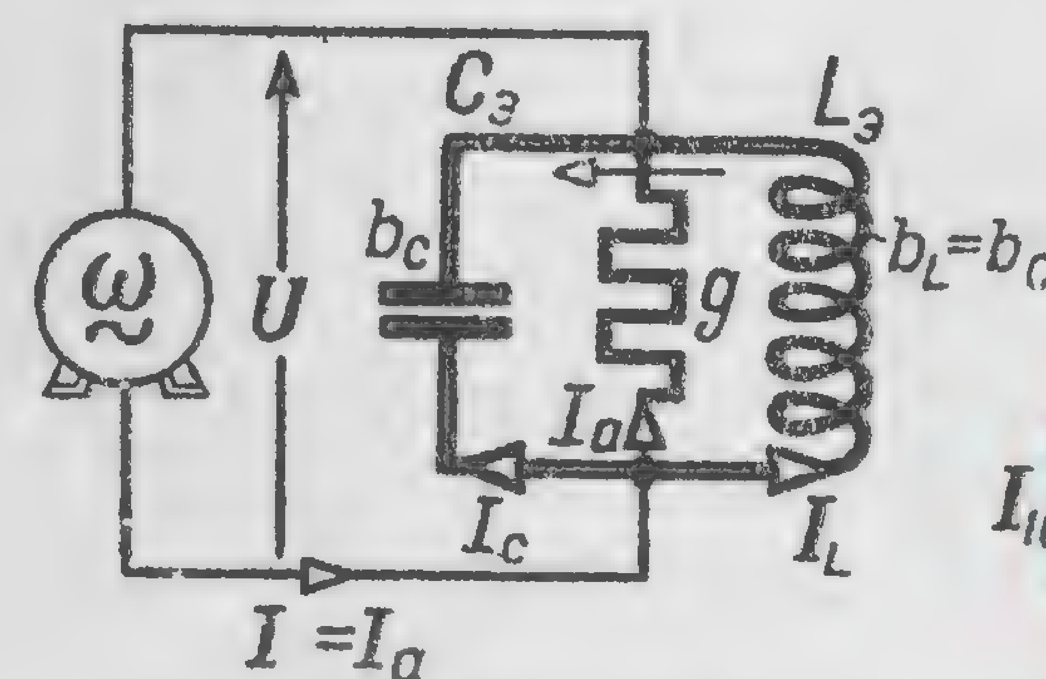
Параллельная цепь из реостата, катушки и конденсатора



Исходная схема

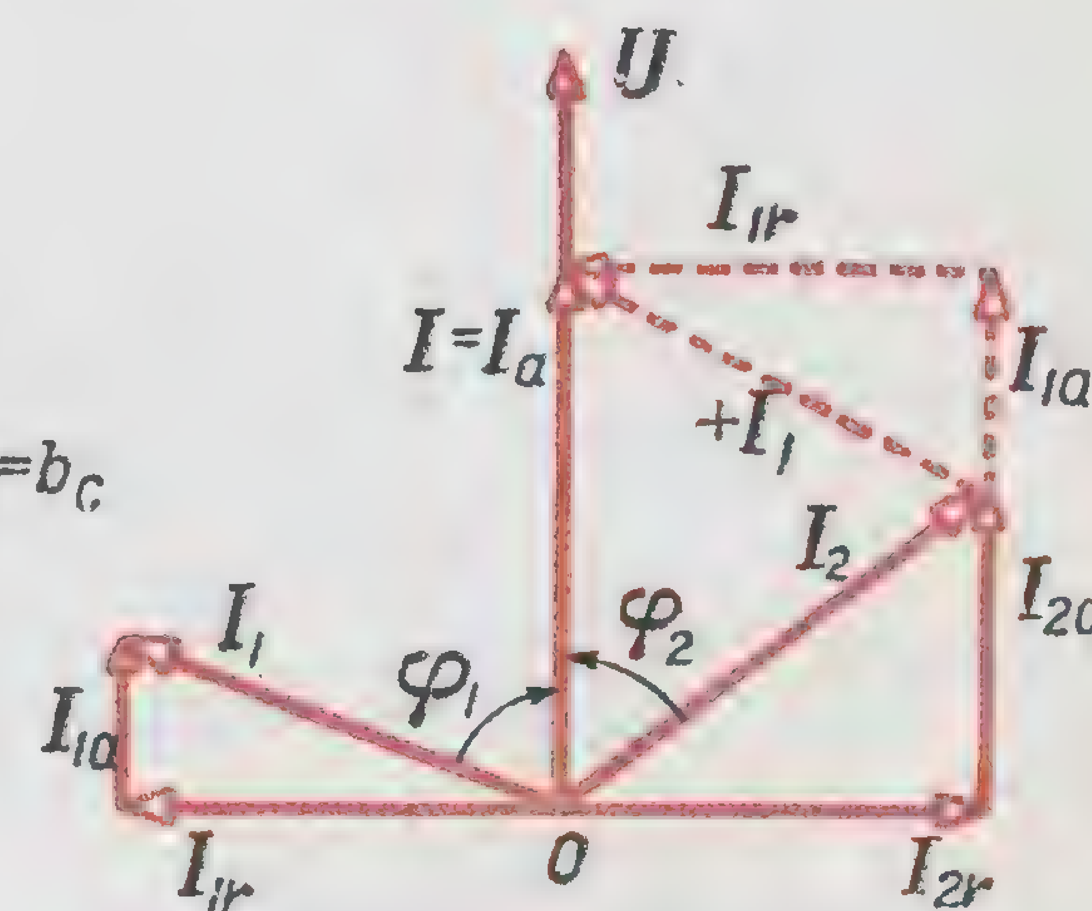


Эквивалентная схема



Эквивалентный колебательный контур

Параллельное соединение двух ветвей при резонансе токов



$\dot{I}_{1r} = -\dot{I}_{2r}$; $b_L = b_C$

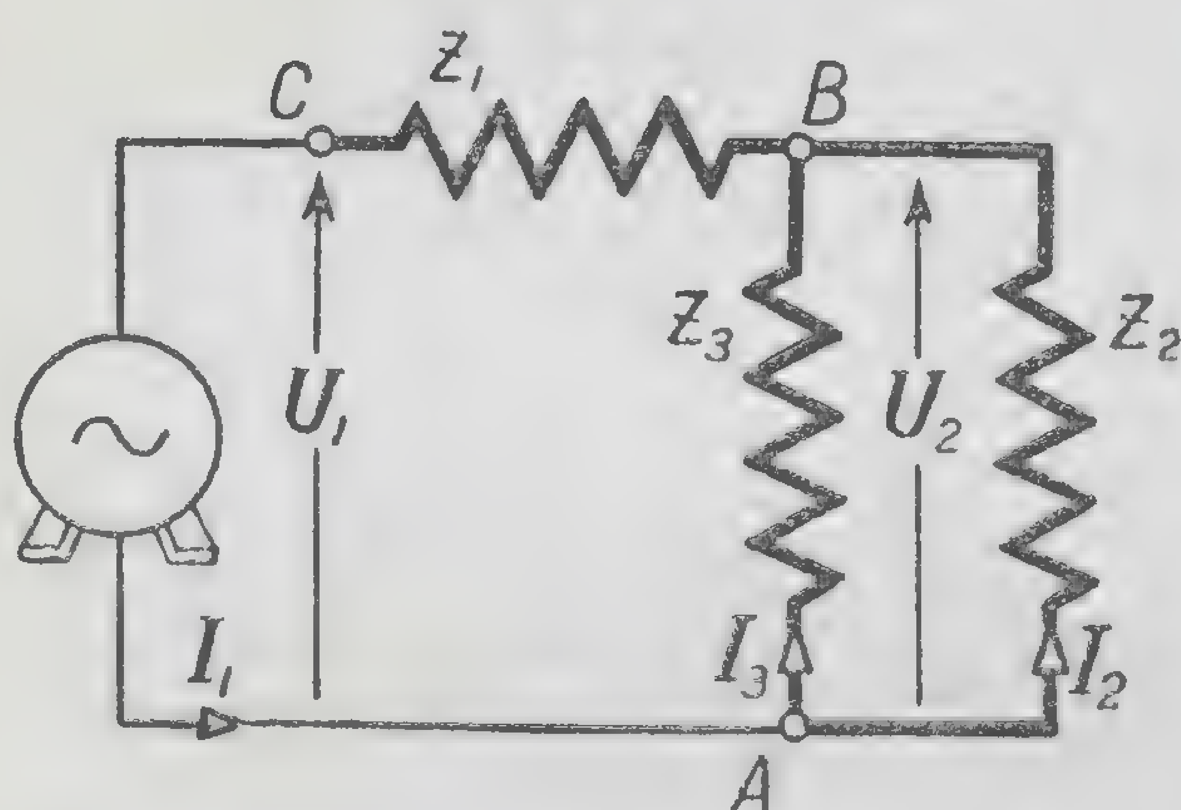
$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_э C_э}} = \omega_{0э}$

Условие резонанса токов

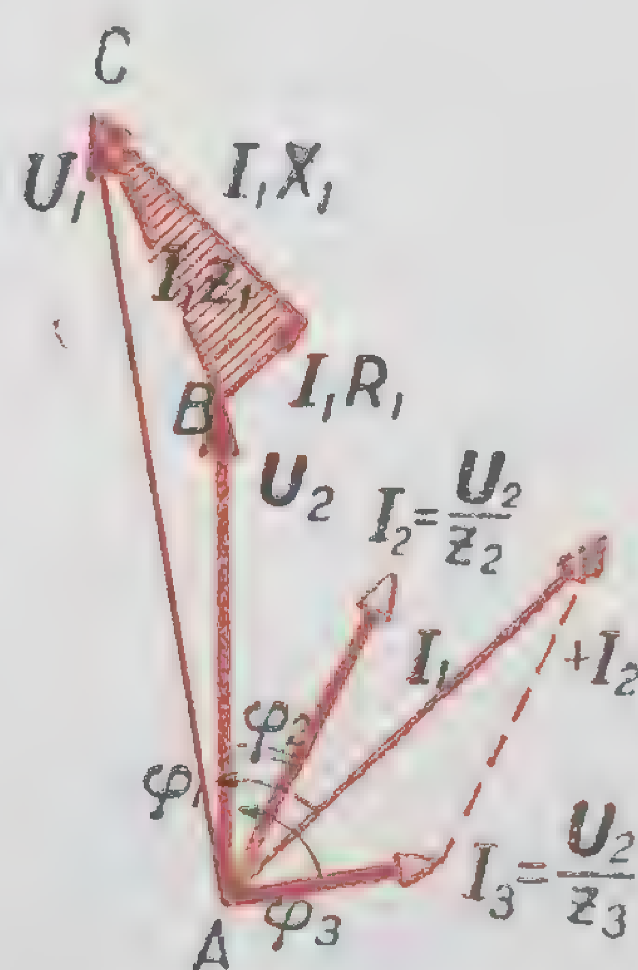
Э. И. Расовский

Худ. А Меньшиков

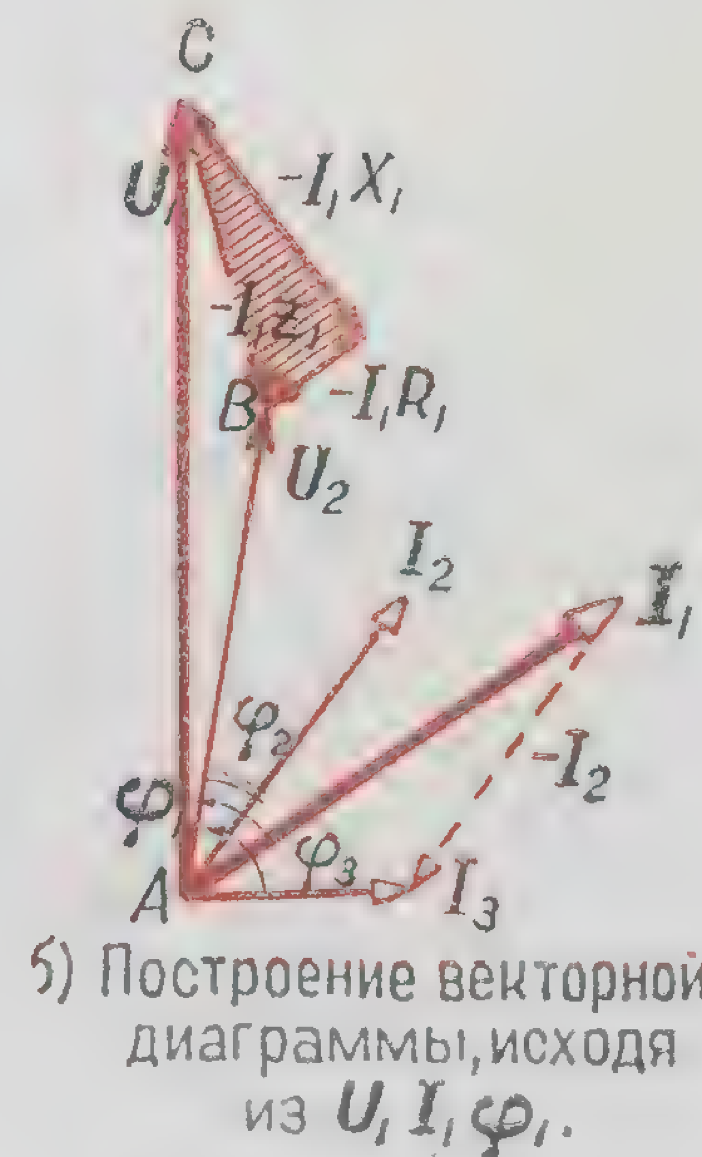
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



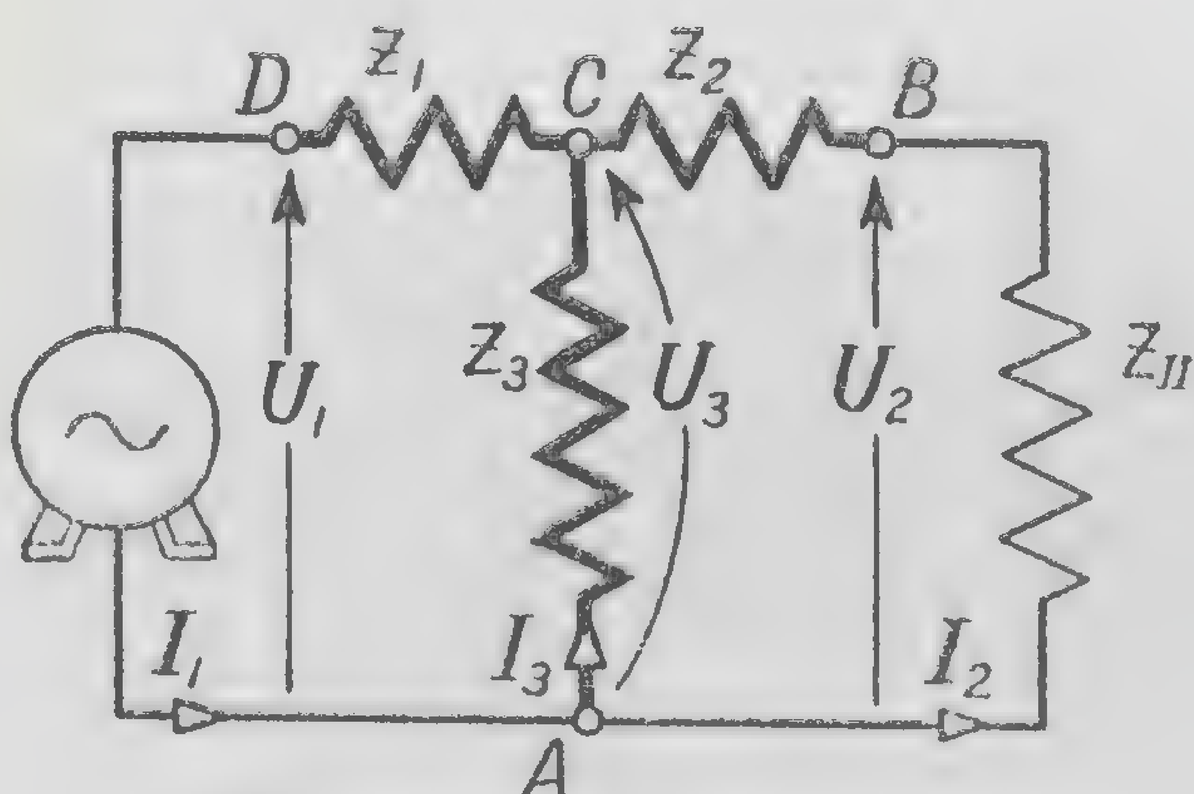
Последовательно-параллельное соединение трех участков.



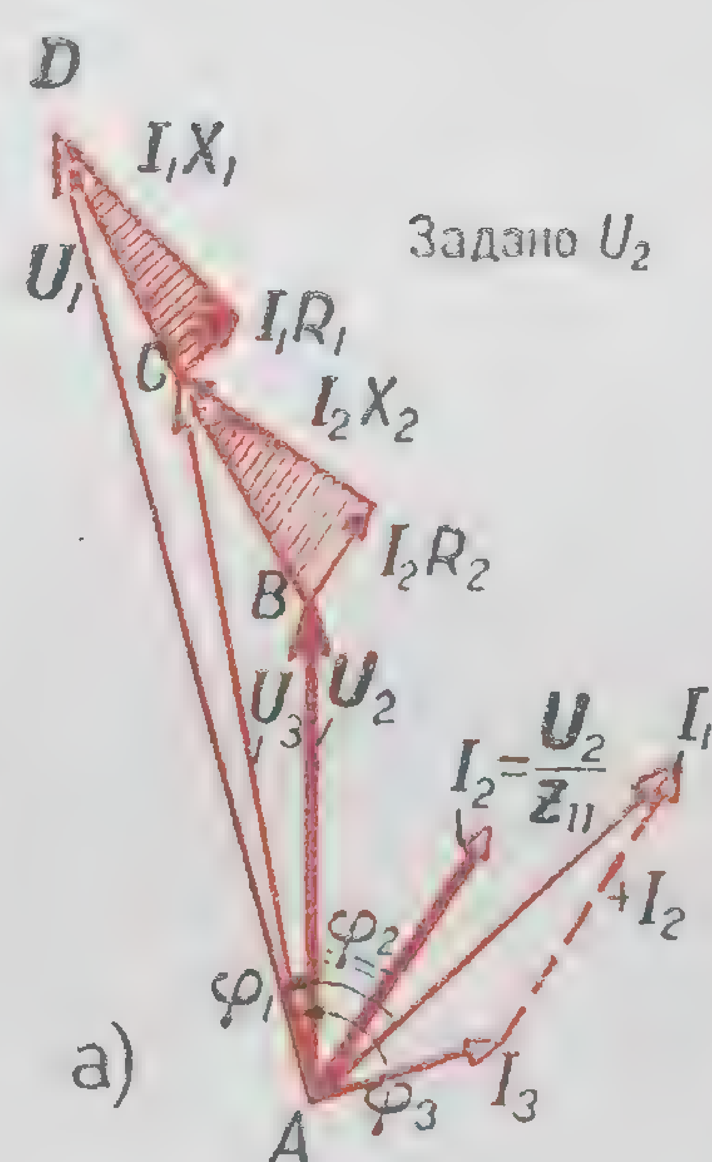
а) Векторная диаграмма при заданном U_2

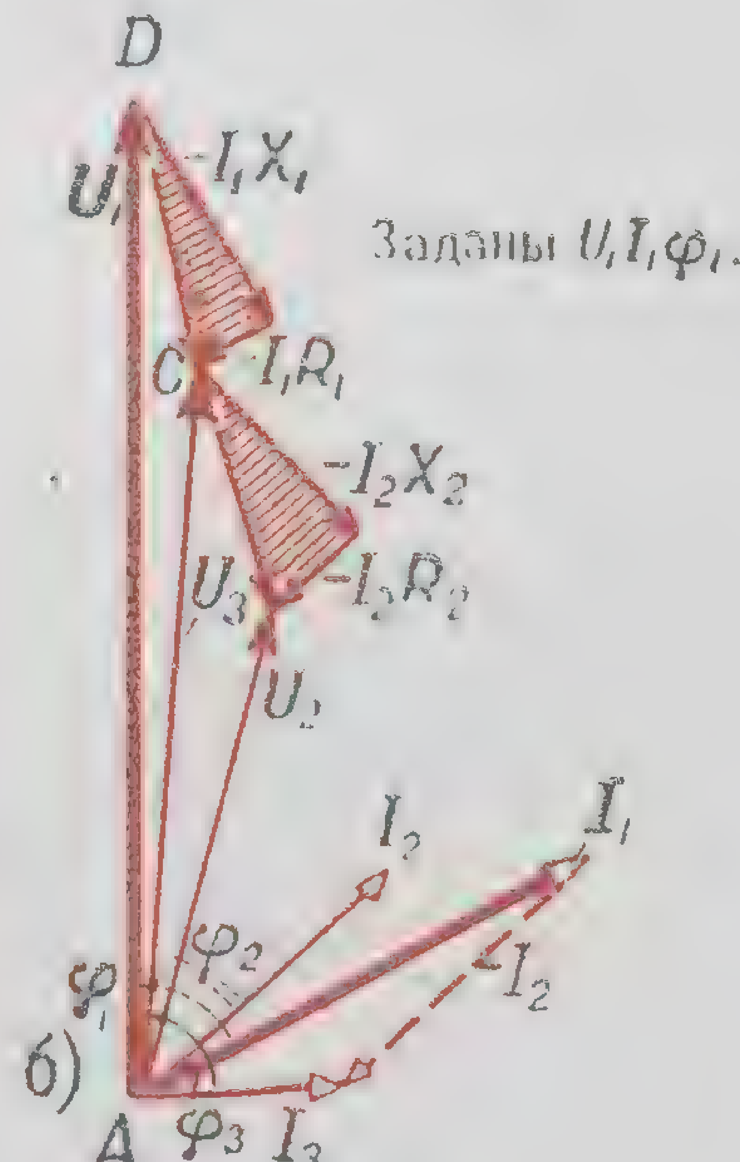


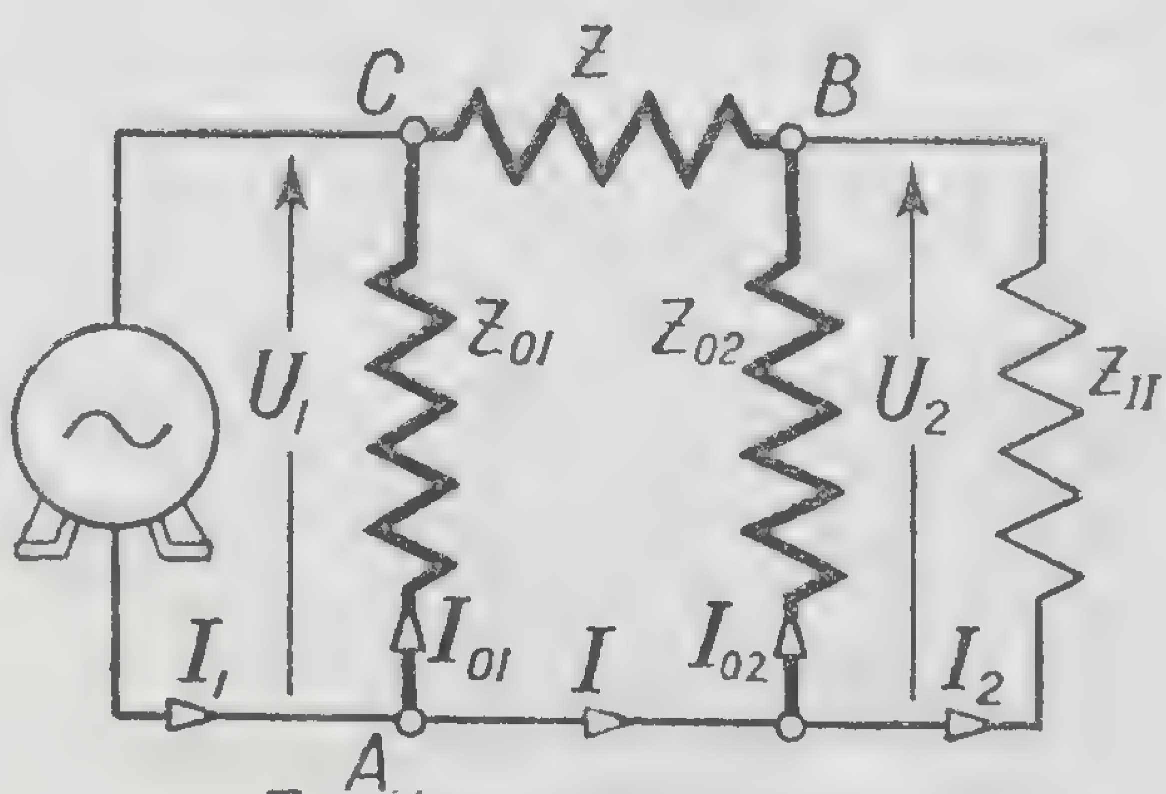
б) Построение векторной диаграммы, исходя из U_1 I_1 φ_1.



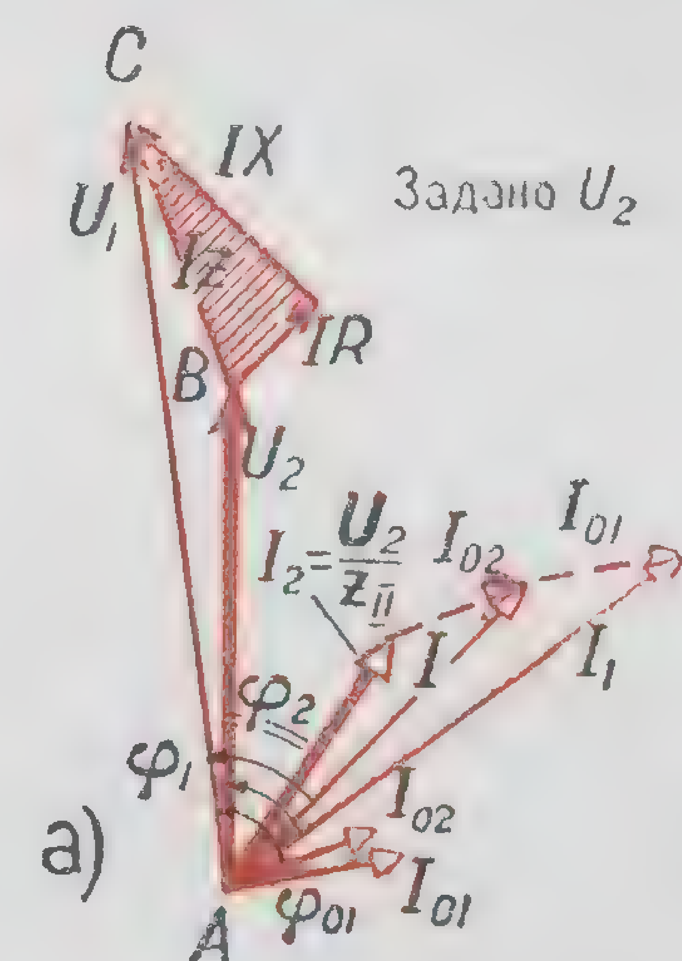
Т-образная схема

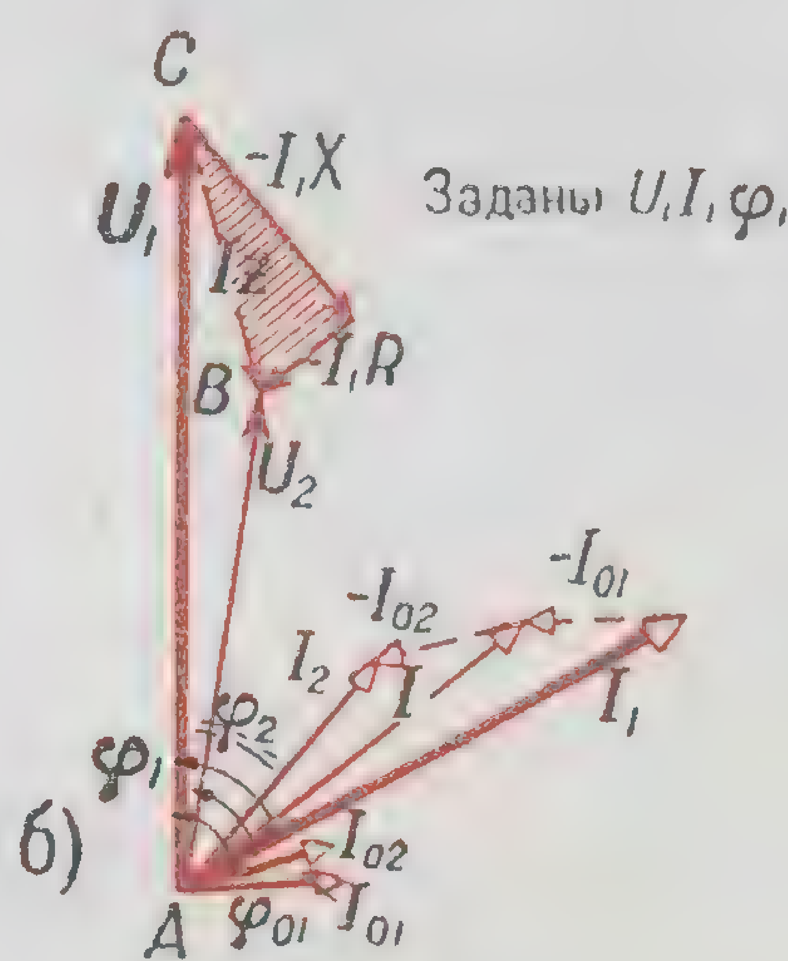






П-образная схема



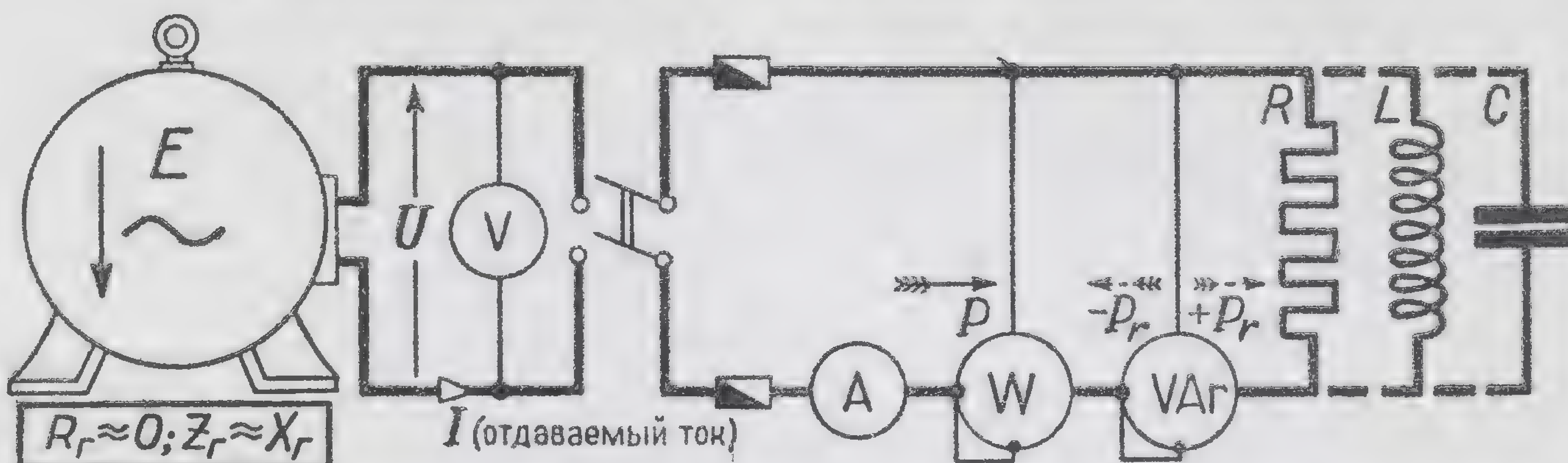


При заданном U_2 токи и напряжения определяются непосредственно из векторной диаграммы.
При известном U_1 задача может быть решена методом подобия:
полагают $U_2=100$ в; найденные при этом условии величины I_2', I_1', U_1' пересчитывают в отношении $\frac{U_1}{U_1'}$

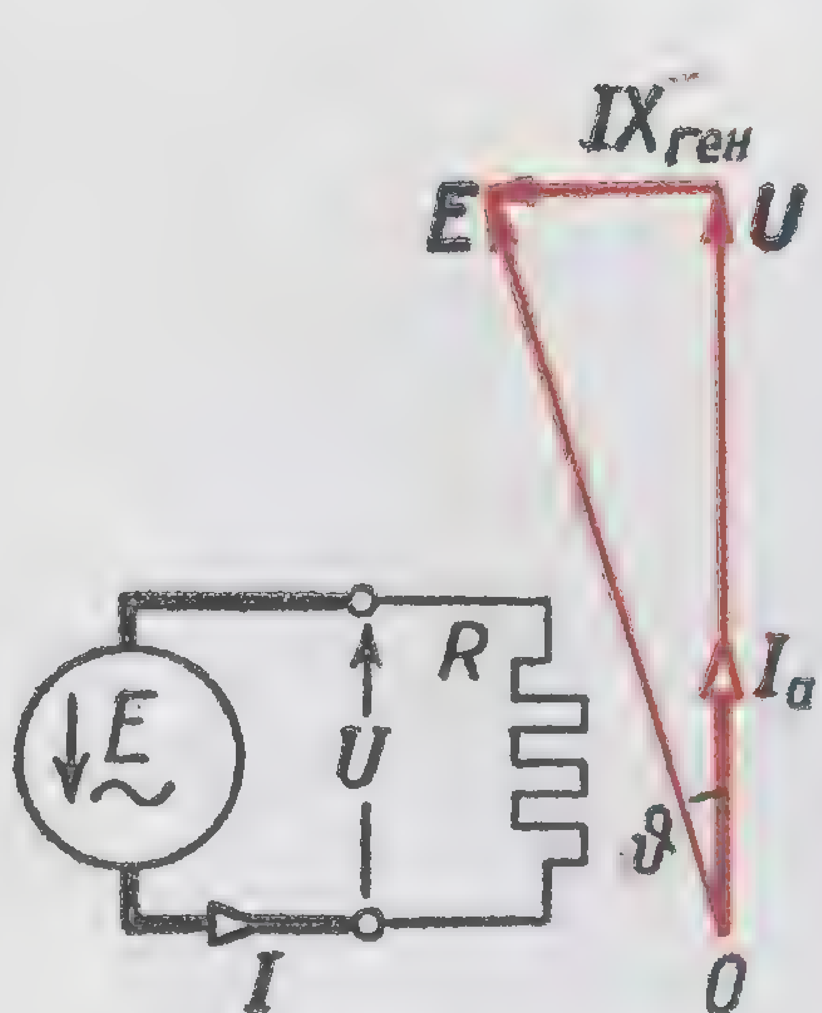
Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

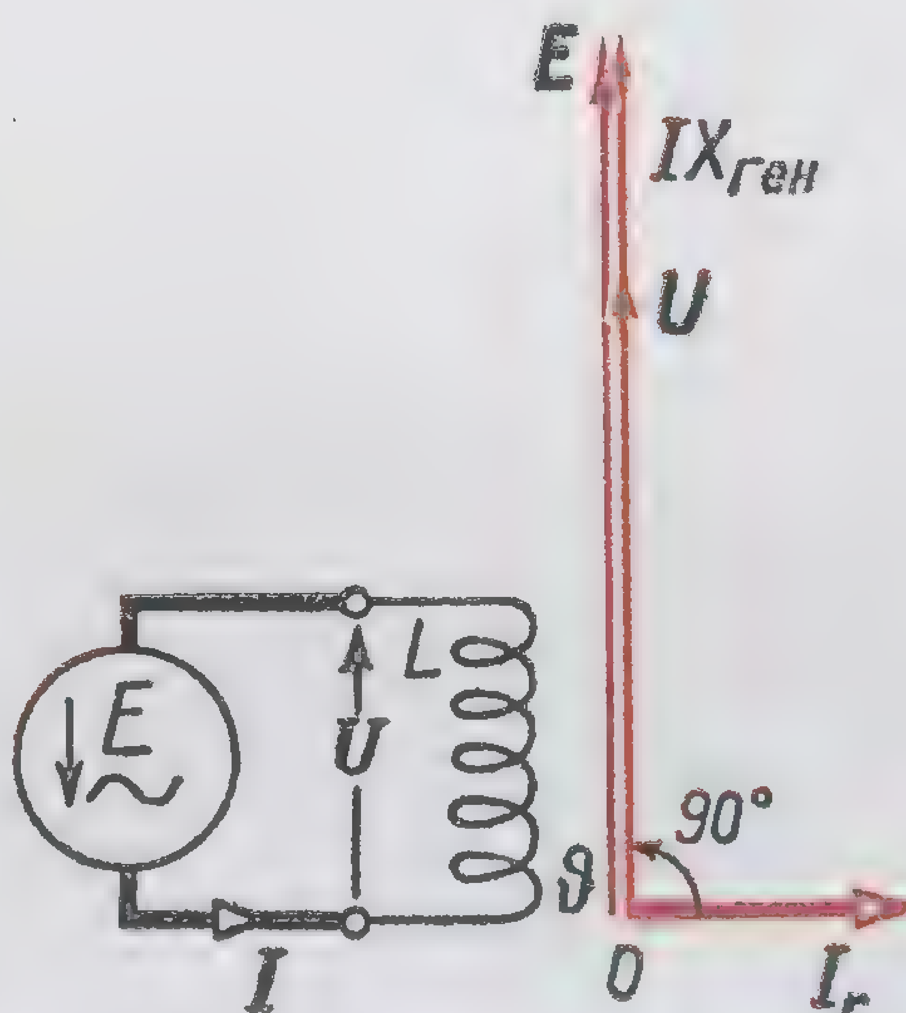
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.



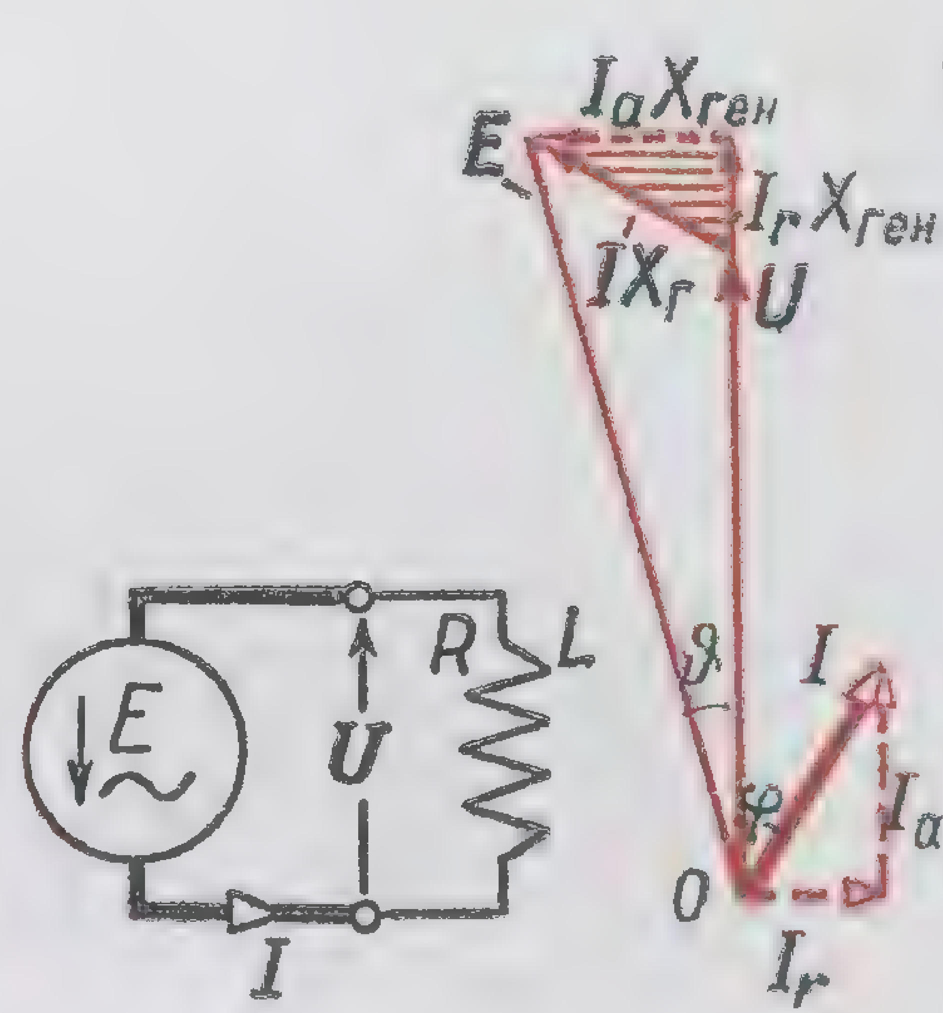
Электрический генератор – источник активной и реактивной мощности („источник" активного и реактивного тока.)



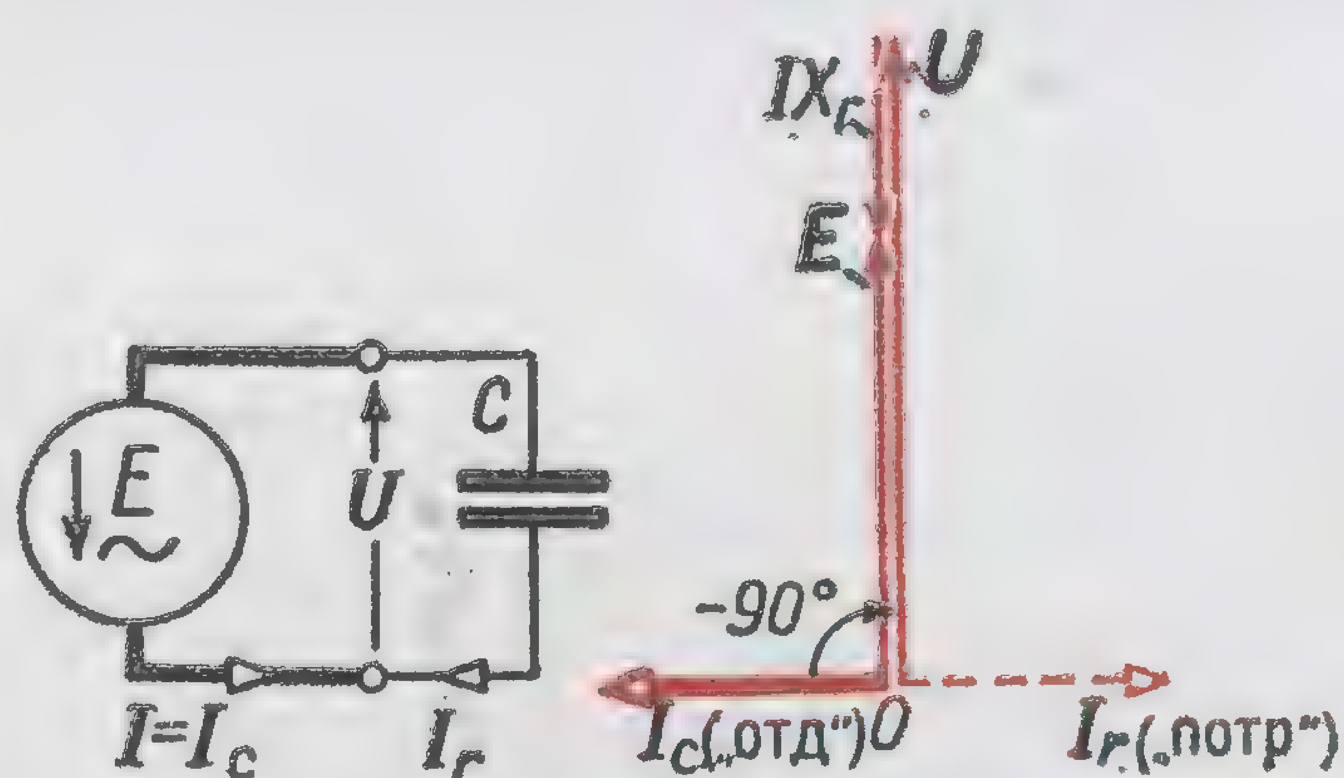
Генератор отдаёт активную мощность („отдаёт" активный ток)



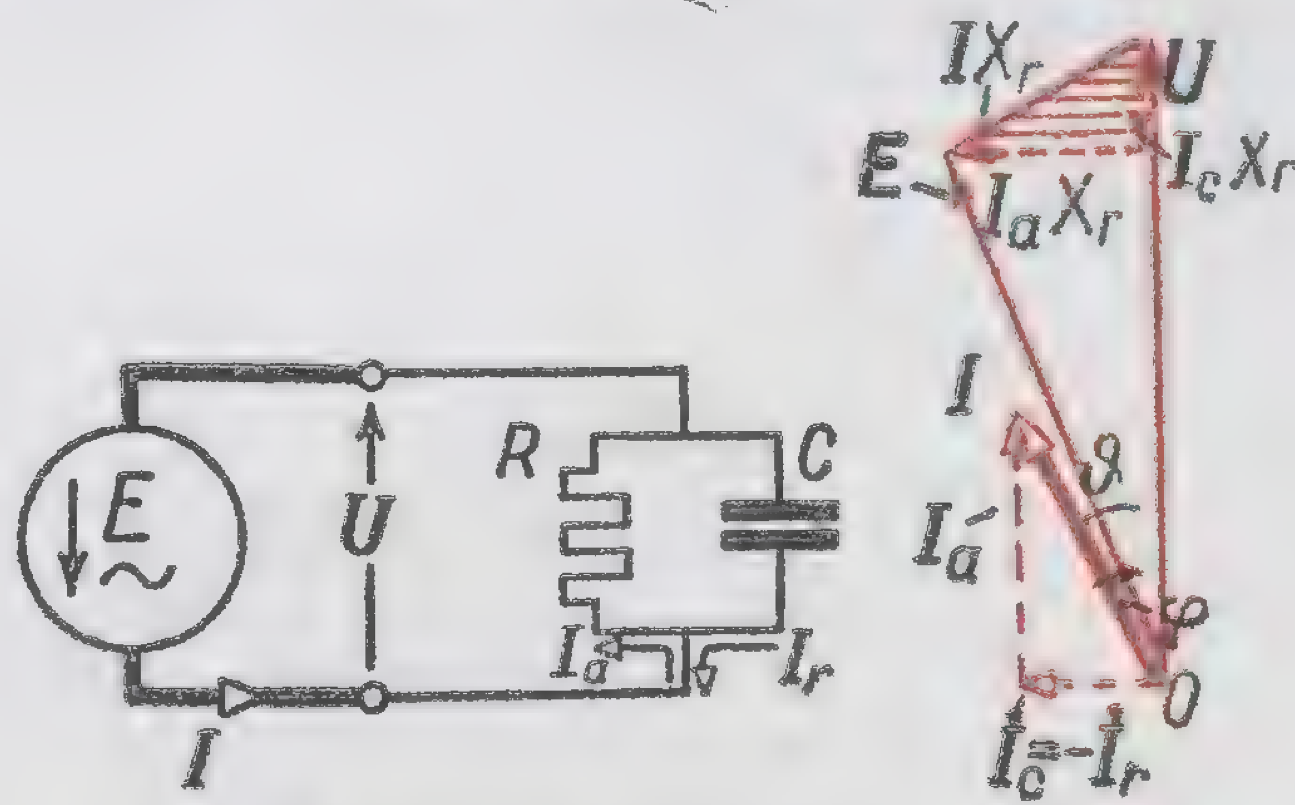
Генератор отдаёт реактивную мощность („отдаёт" реактивный ток)



Генератор отдаёт активную и реактивную мощность („отдаёт" и активный и реактивный ток)



Генератор „отдает" емкостный (опережающий) ток или „потребляет" реактивный (отстающий) ток



Генератор „отдает" активный и „потребляет" реактивный ток

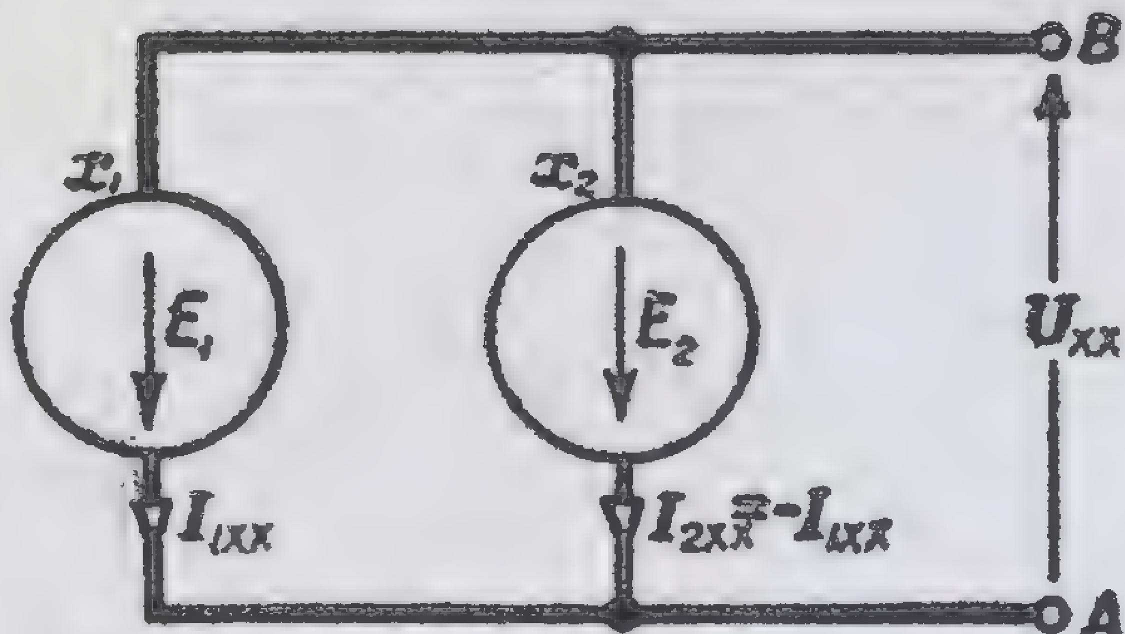
$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}X_г \text{ в}$$

Электродвижущая сила генератора равна геометрической сумме напряжения на зажимах и падения напряжения в его обмотке

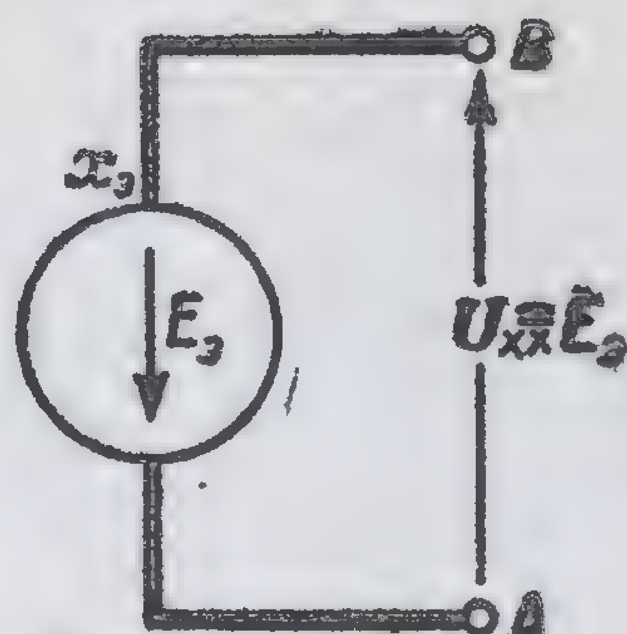
Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ



Параллельное соединение генераторов при холостом ходе



Эквивалентный генератор



Векторная диаграмма ($x_1=2x_2$)

$\Delta\dot E = \dot E_1 - \dot E_2$ в — Разность э.д.с.

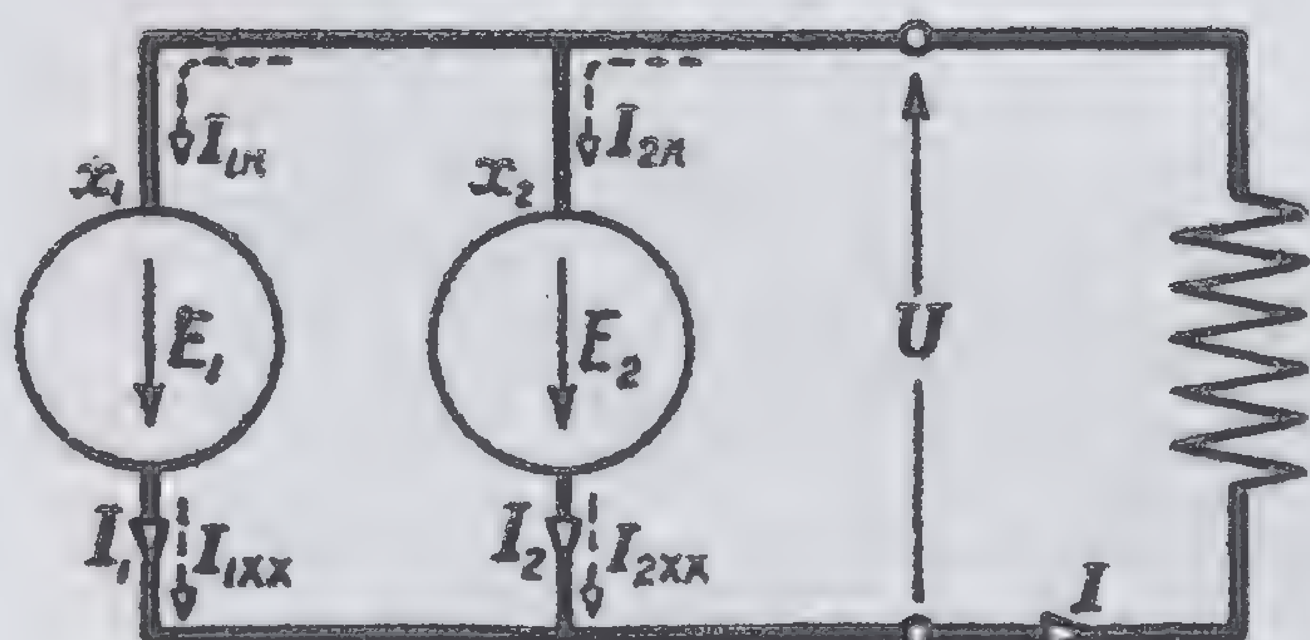
$I_{1xx} = \frac{\Delta E}{x_1+x_2}$ а — Уравнительный ток

$I_{1xx} \cdot x_1 = \Delta E \frac{x_1}{x_1+x_2}$ в — Падение напряжения

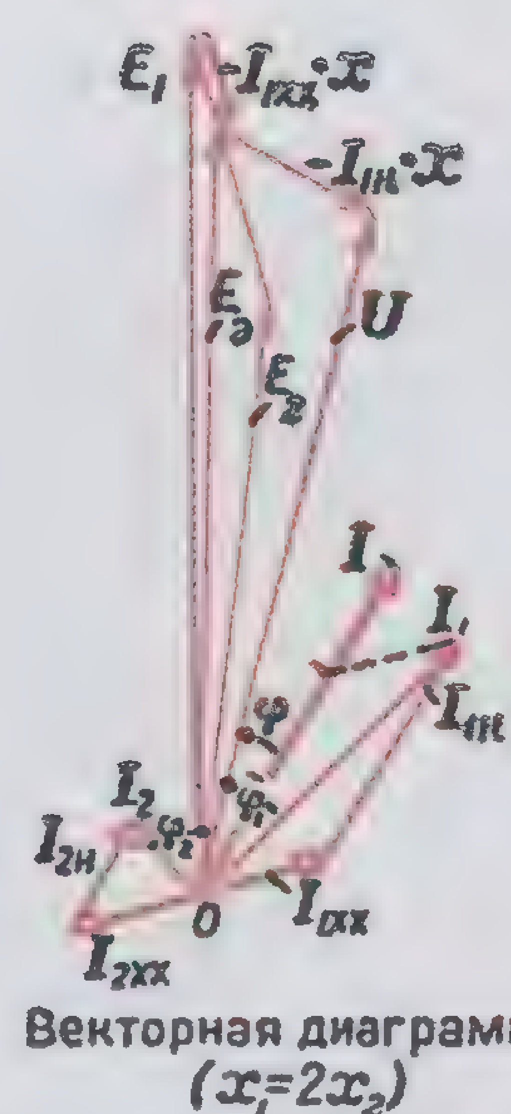
$U_{xx} = \dot E_3 = \dot E_1 - \Delta\dot E \frac{x_1}{x_1+x_2} = \frac{\dot E_1 x_2 + \dot E_2 x_1}{x_1+x_2}$ в — Напряжение холостого хода (э.д.с. эквивалентного генератора)

$x_э = \frac{x_1 x_2}{x_1+x_2}$ ом — Сопротивление эквивалентного генератора

ХОЛОСТОЙ ХОД ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ



Параллельное соединение при нагрузке



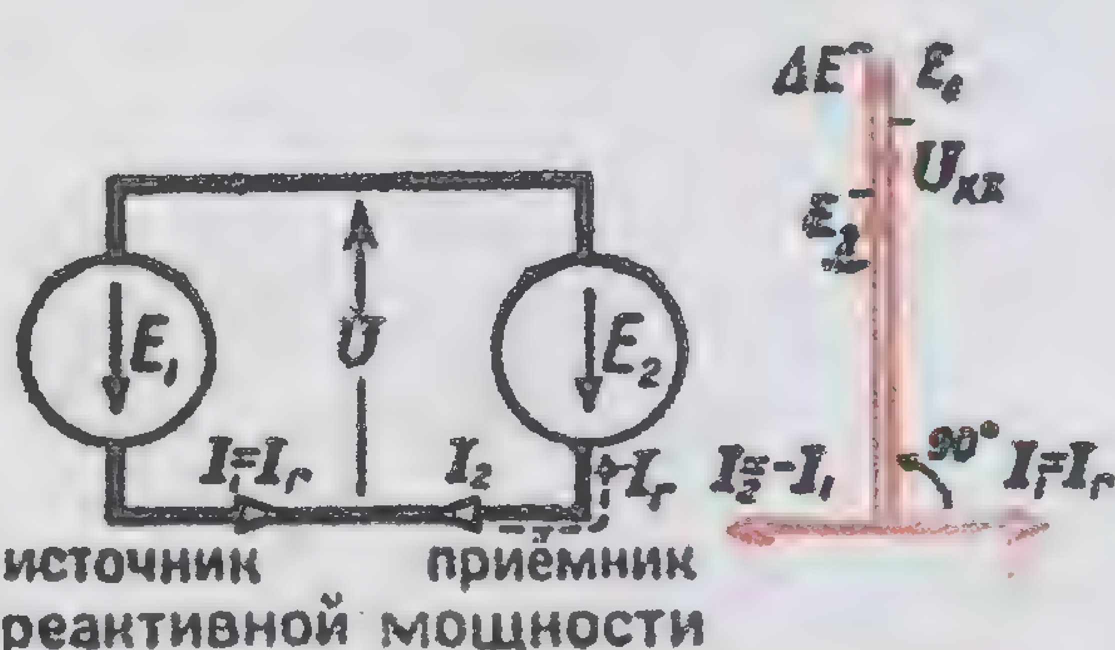
Векторная диаграмма ($x_1=2x_2$)

$I_{1н} : I_{2н} = I\frac{x_1}{x_1+x_2} : I\frac{x_2}{x_1+x_2} = x_2 : x_1$ — Распределение тока нагрузки между генераторами

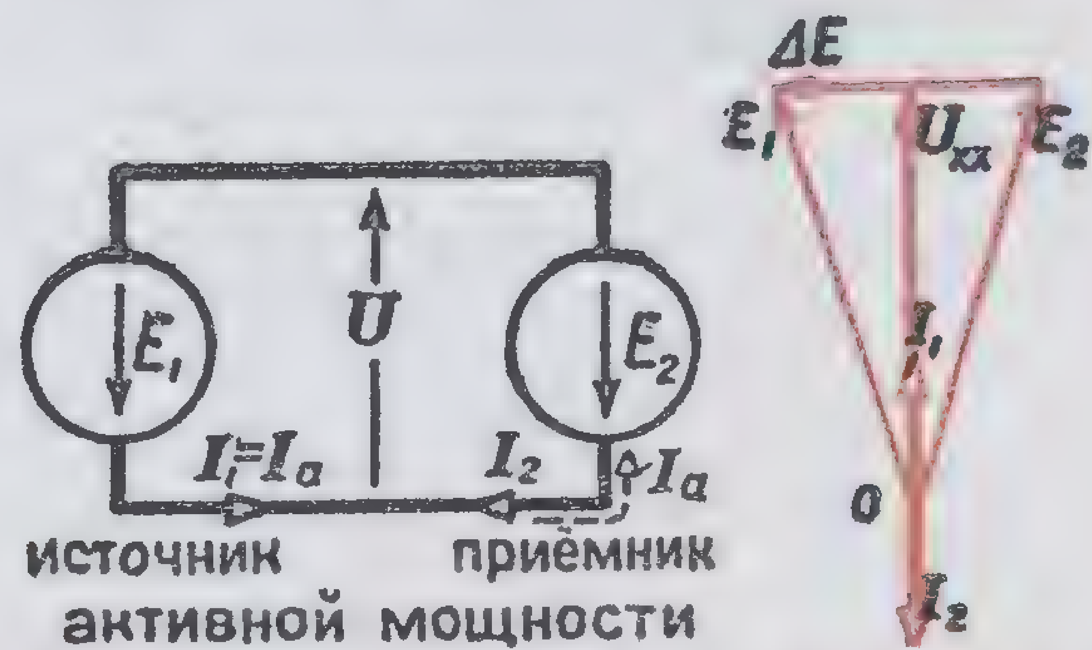
$\dot I_1 = \dot I_{1xx} + \dot I_{1н}$ а $\dot I_2 = \dot I_{2xx} + \dot I_{2н}$ а — Токи генераторов.

Ток параллельно включенного генератора при нагрузке состоит из уравнительного тока холостого хода и доли общего тока нагрузки, распределяющегося между генераторами обратно пропорционально их сопротивлениям

НАГРУЗКА ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ



источник реактивной мощности — приёмник реактивной мощности



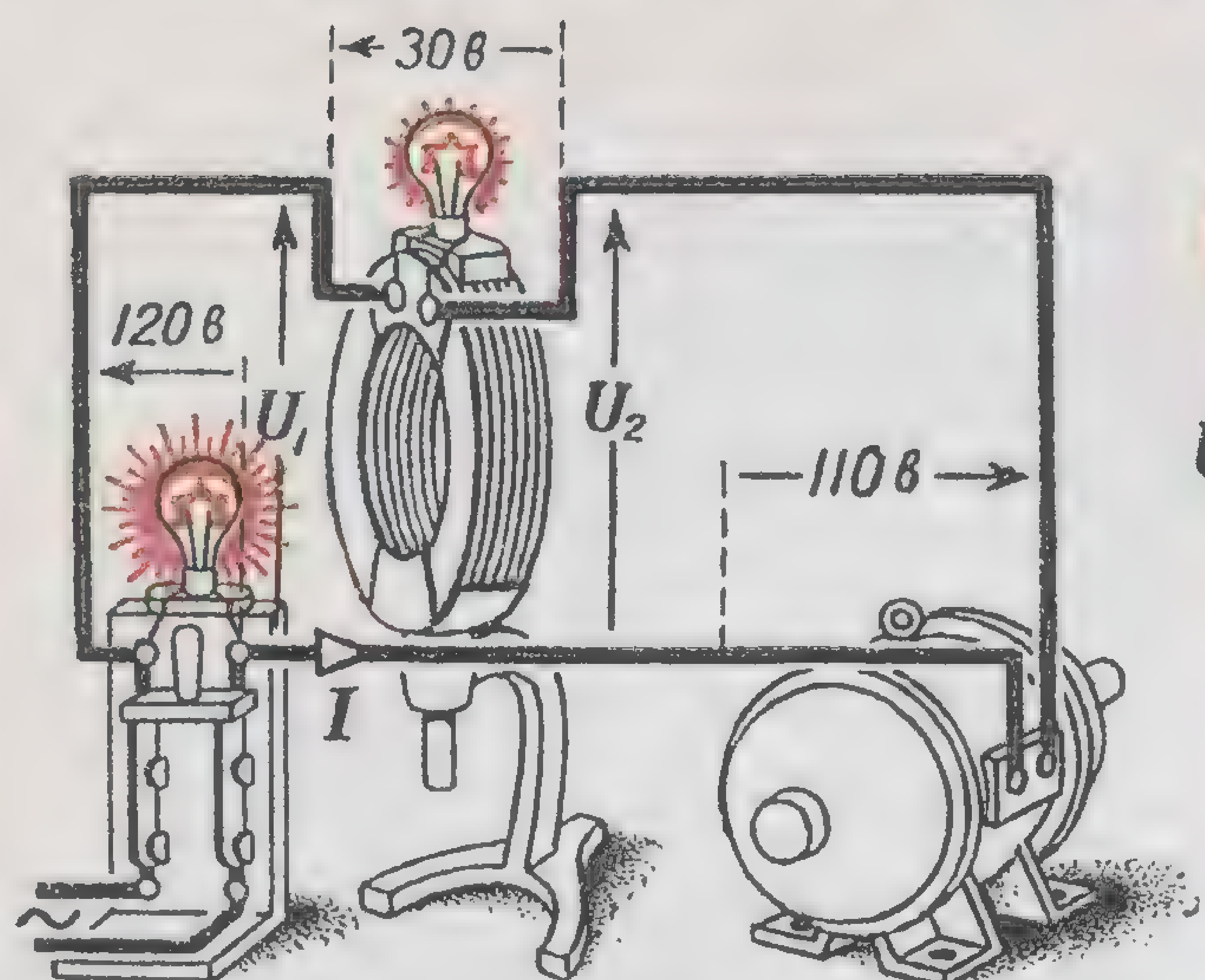
источник активной мощности — приёмник активной мощности

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ХОЛОСТОГО ХОДА ОДИНАКОВЫХ МАШИН ($x_1=x_2$)

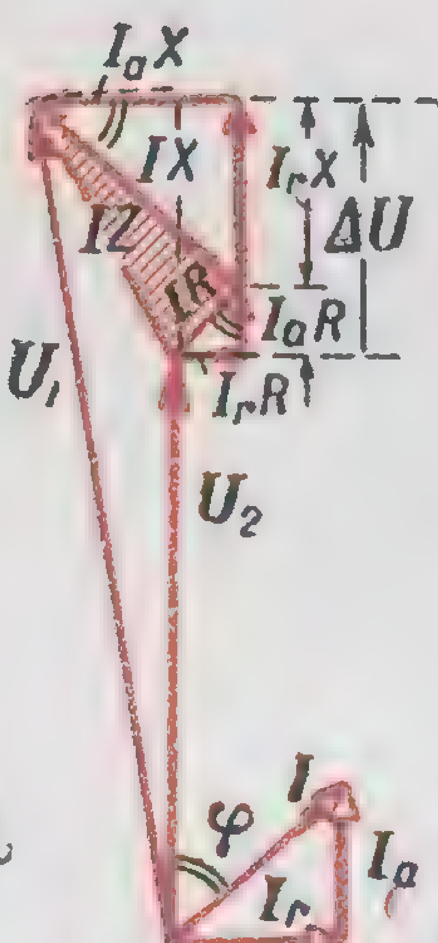
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ПАДЕНИЕ И ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ



Питание силовой нагрузки через реактивную катушку



Векторная диаграмма

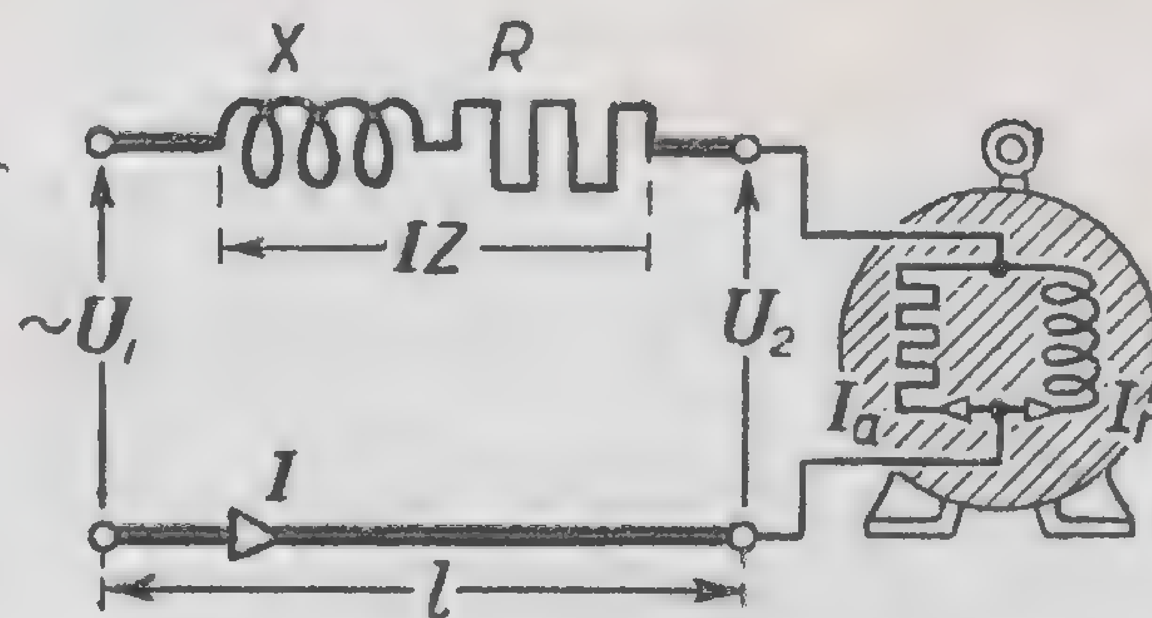


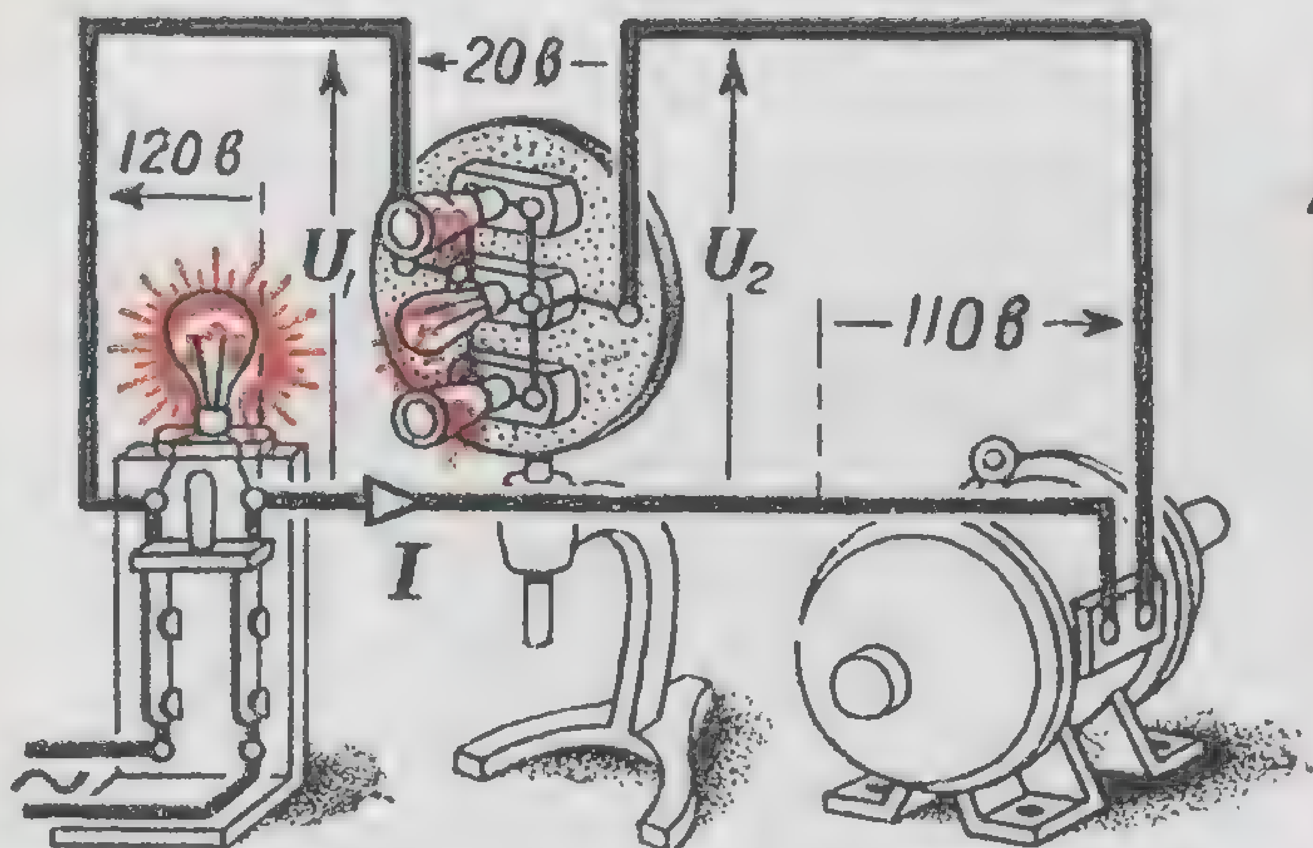
Схема замещения линии без учета ее емкости

$U_1 - U_2 = \Delta U$ в
Потеря напряжения (арифметическая разность)

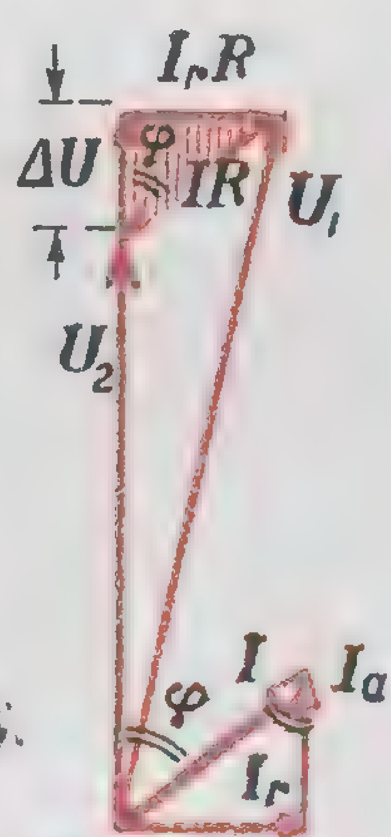
$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}\dot{Z}$ в
Падение напряжения. (геометрическая разность)

$\Delta U \approx IR\cos\varphi + IX\sin\varphi = I_aR + I_rX$ в
Потеря напряжения в линии

$\Delta p = I^2R = I_a^2R + I_r^2R = I_a^2R(1+tg^2\varphi)$ вт
Потеря мощности в линии



Питание силовой нагрузки через активное сопротивление



Векторная диаграмма

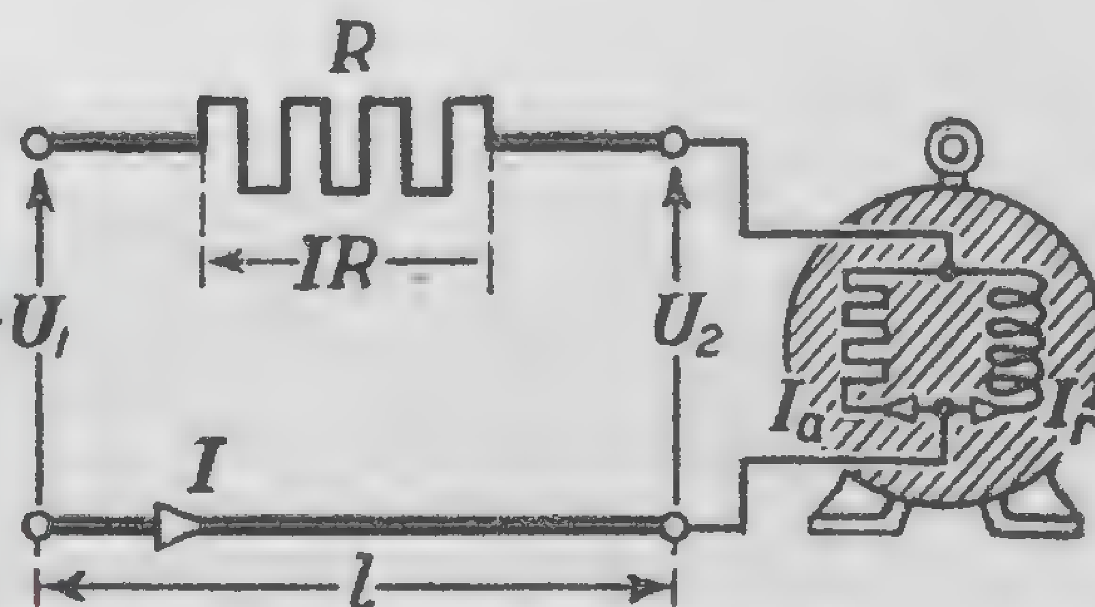
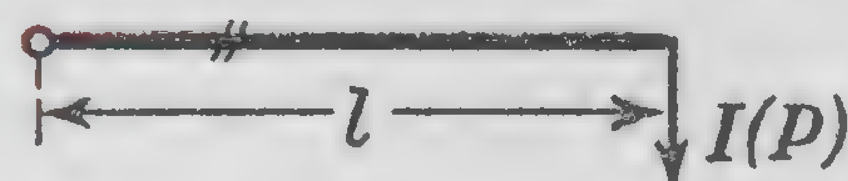


Схема замещения безреактивной линии



Однолинейная схема двухпроводной линии

$S = \frac{2}{\gamma\Delta U} I\cos\varphi l$ мм² $S = \frac{200}{\gamma\Delta U\% U^2} Pl$ мм² $S = \frac{200}{\gamma\Delta p\% U^2\cos^2\varphi} Pl$ мм²

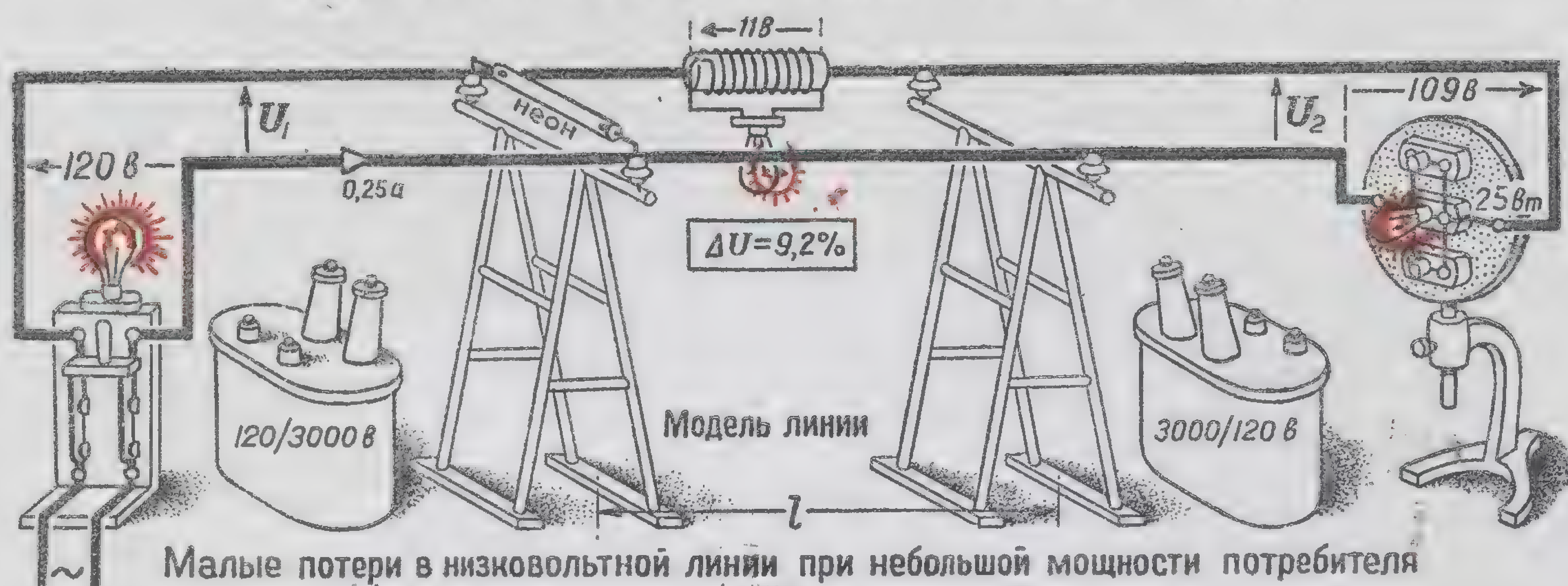
Расчет безреактивных проводов по потере напряжения в вольтах (ΔU), по потере напряжения в процентах (ΔU%) и по потере мощности в процентах (Δp%)

ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ и **ПОТЕРЯ МОЩНОСТИ** в линии вызываются полным током нагрузки.
ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ складывается:
из потери в активном сопротивлении от активного тока и из потери в реактивном сопротивлении линии от реактивного тока нагрузки

Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ
(ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА)



Малые потери в низковольтной линии при небольшой мощности потребителя



Значительные потери в низковольтной линии при наличии мощного потребителя



Ничтожные потери в высоковольтной линии при наличии мощного потребителя

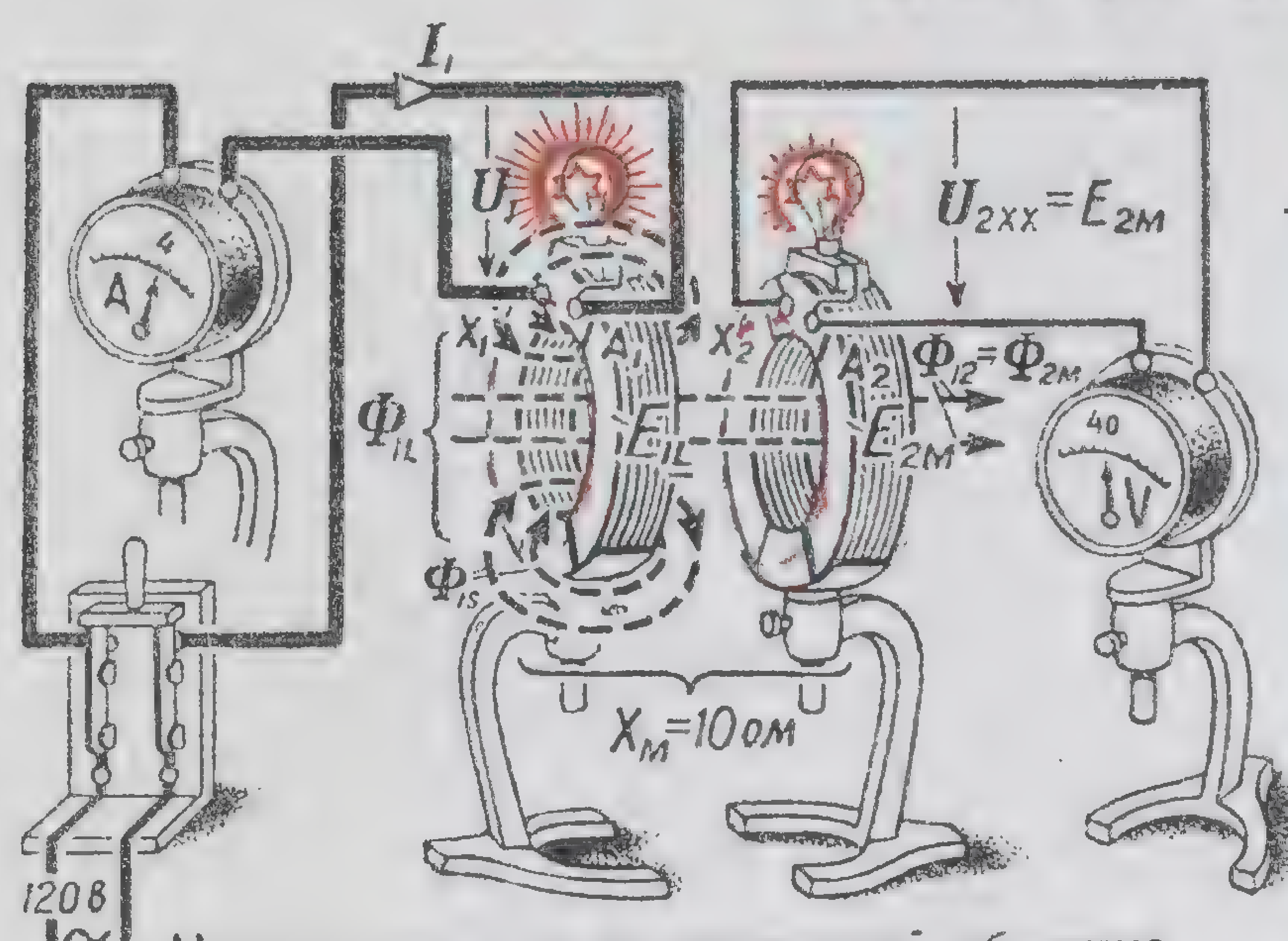


Небольшие потери в высоковольтной линии при значительной мощности нагрузки

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ЦЕПИ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ

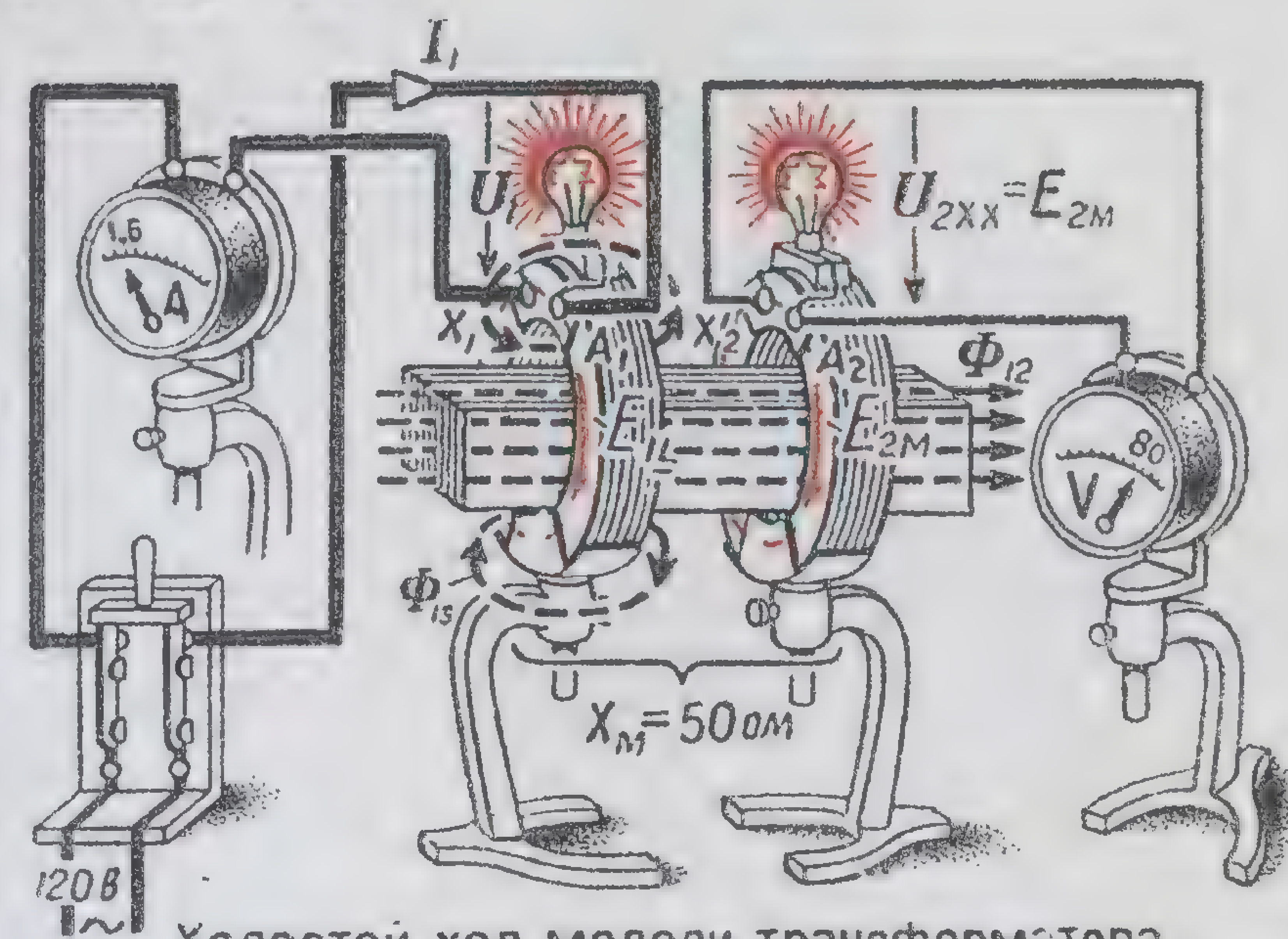


Наведение э.д.с. во вторичной обмотке воздушного трансформатора

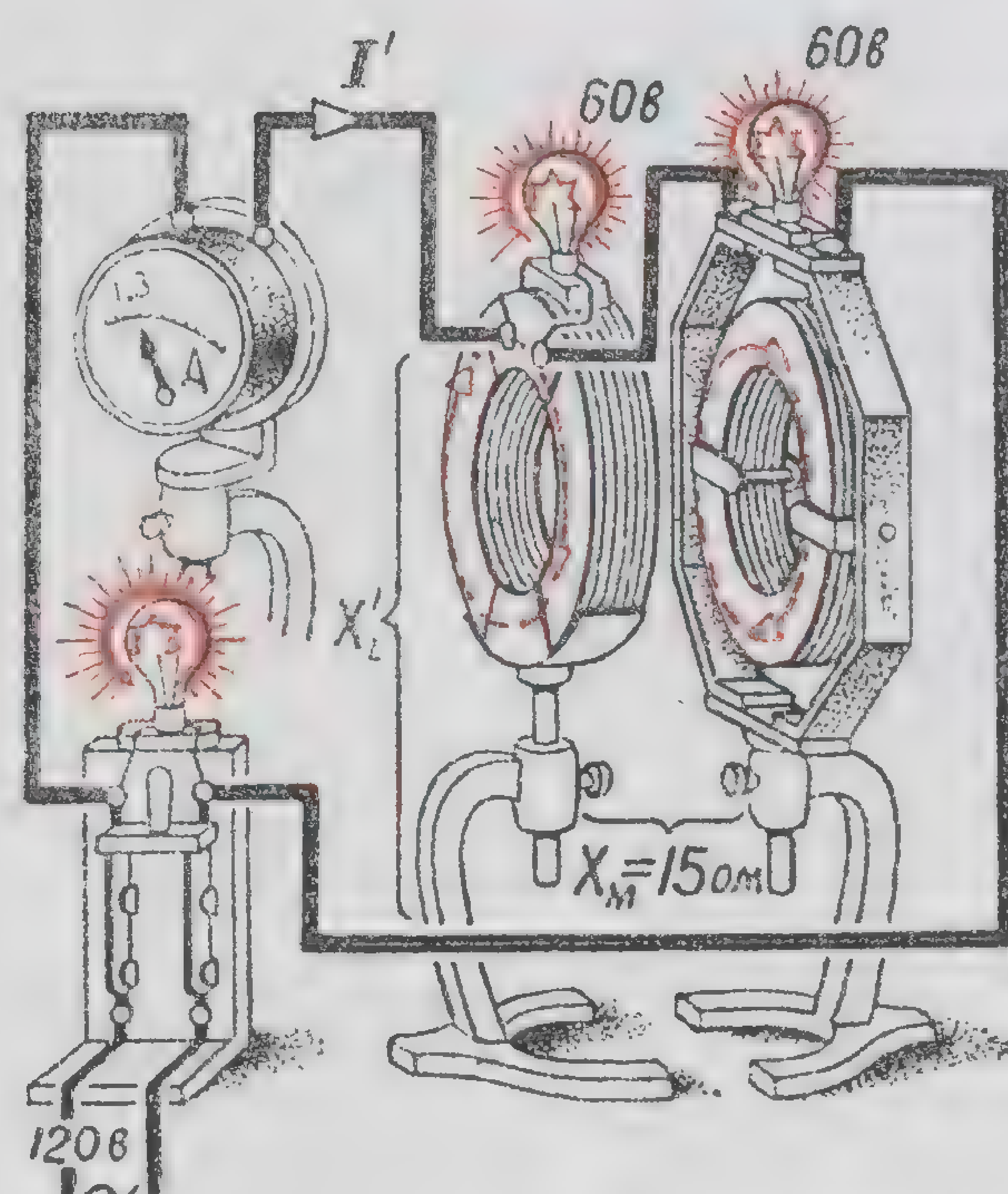


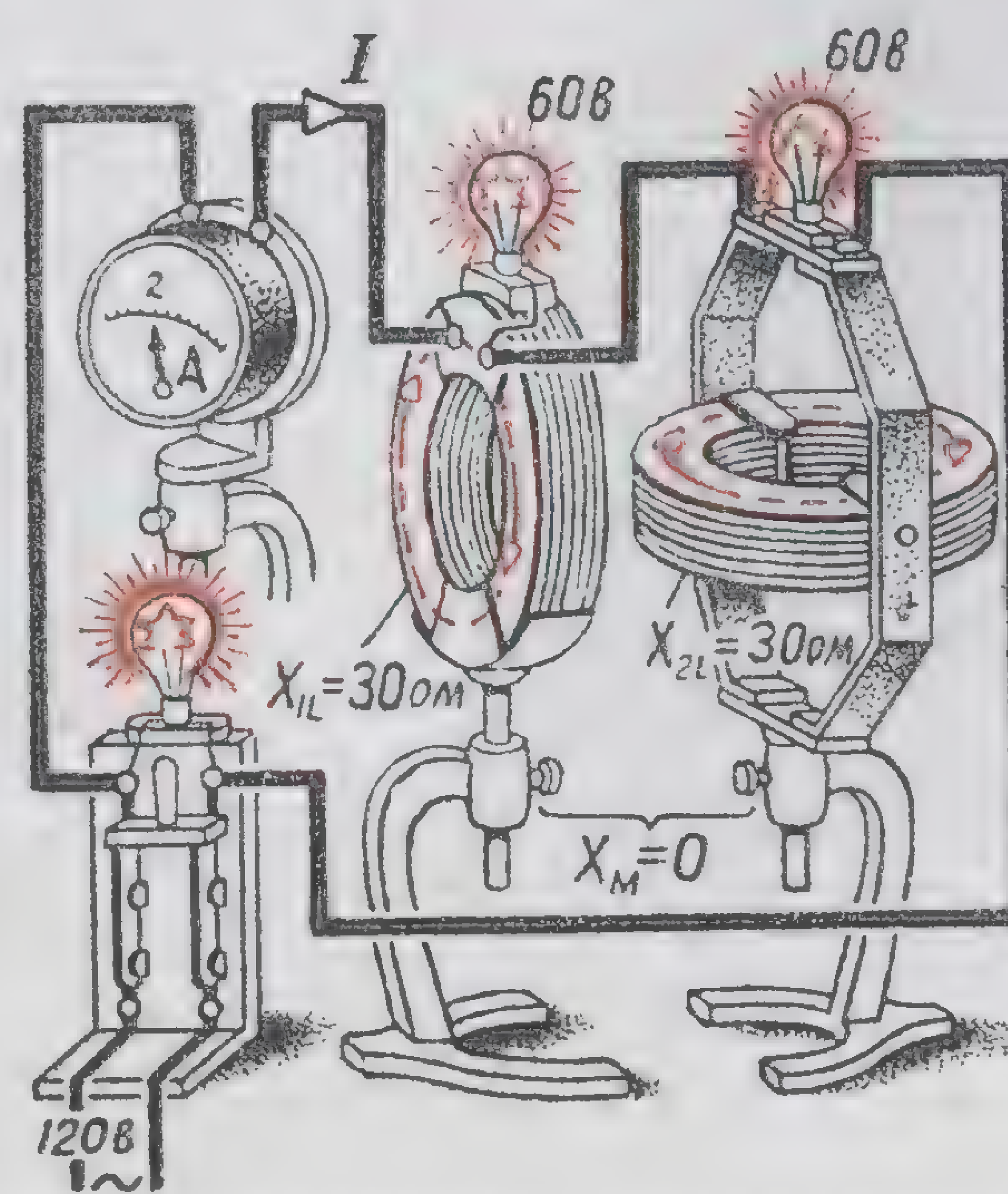
$$X_м = \omega M = \frac{E_{2м}}{I_1} \text{ ом}$$

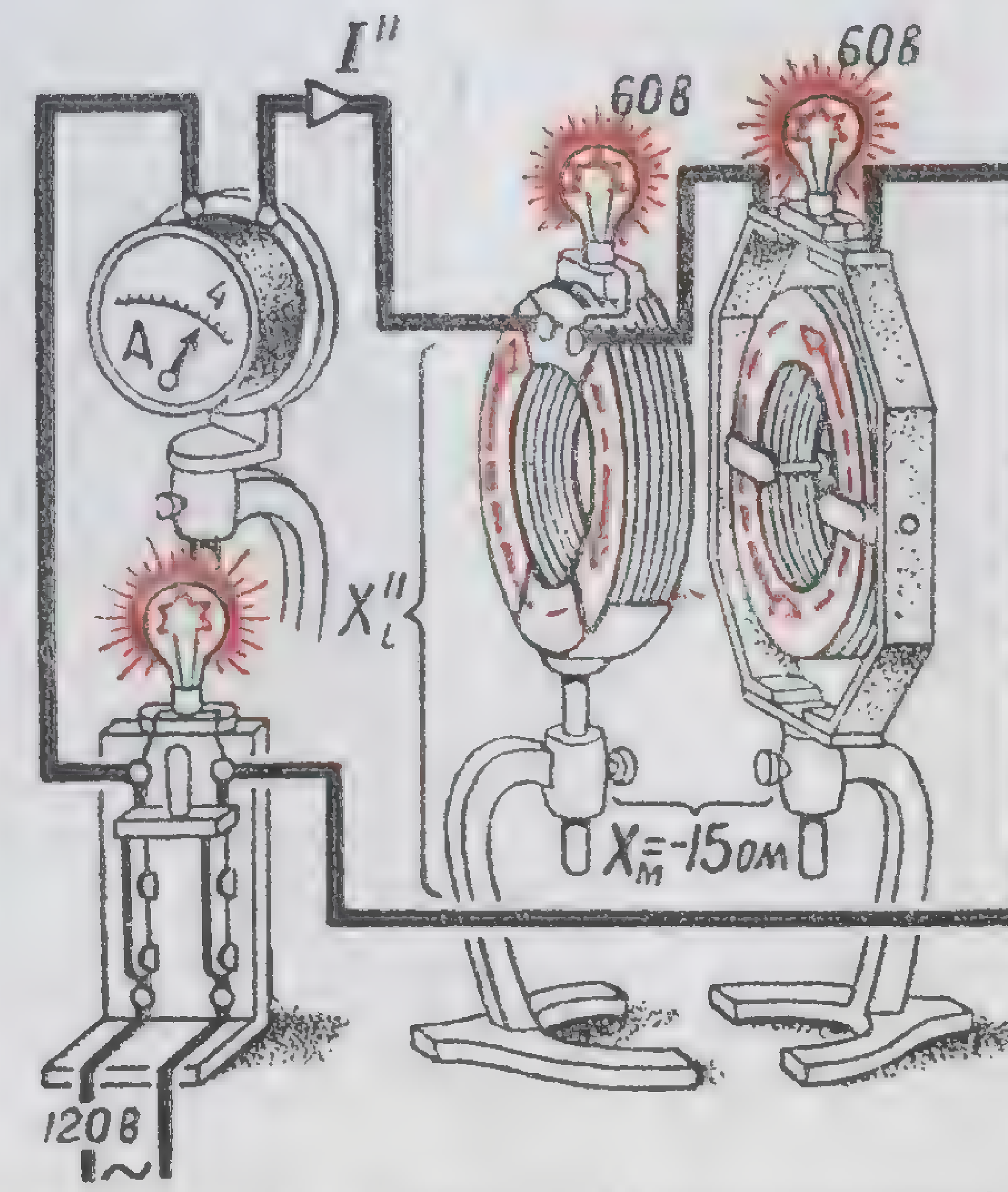
сопротивление взаимоиндукции



Холостой ход модели трансформатора со стальным сердечником







$$X' - X'' = 4X_м \text{ ом}$$

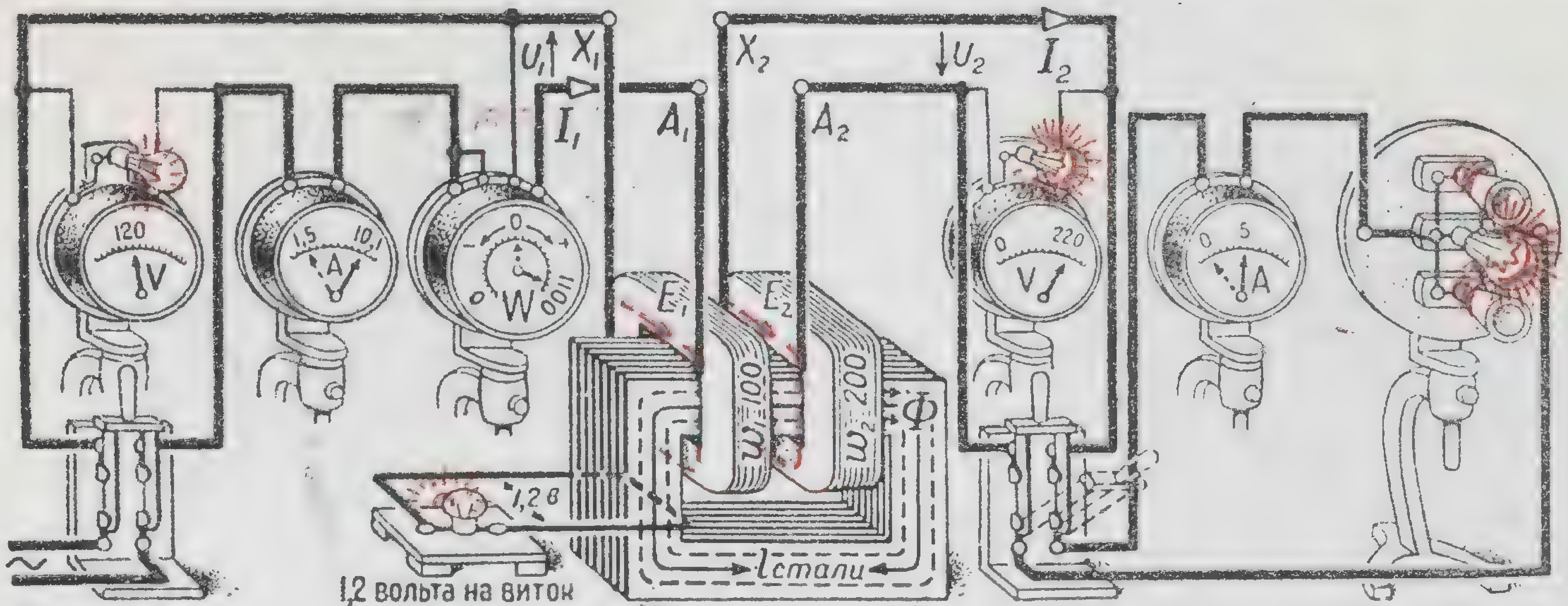
Пределы изменения индуктивного сопротивления цепи

Последовательное соединение индуктивно связанных цепей (вариометр)

З.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ



Холостой ход и нагрузка идеального трансформатора

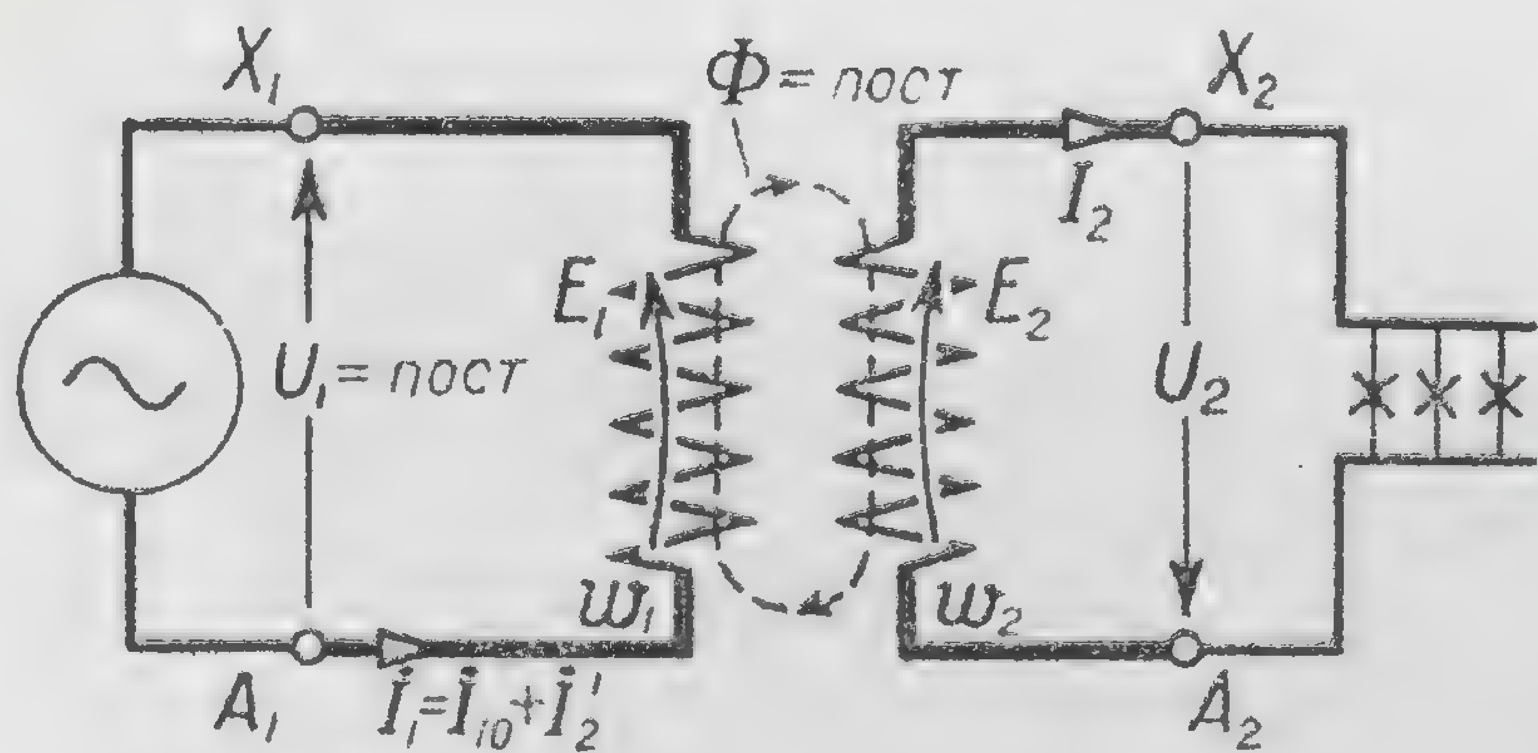
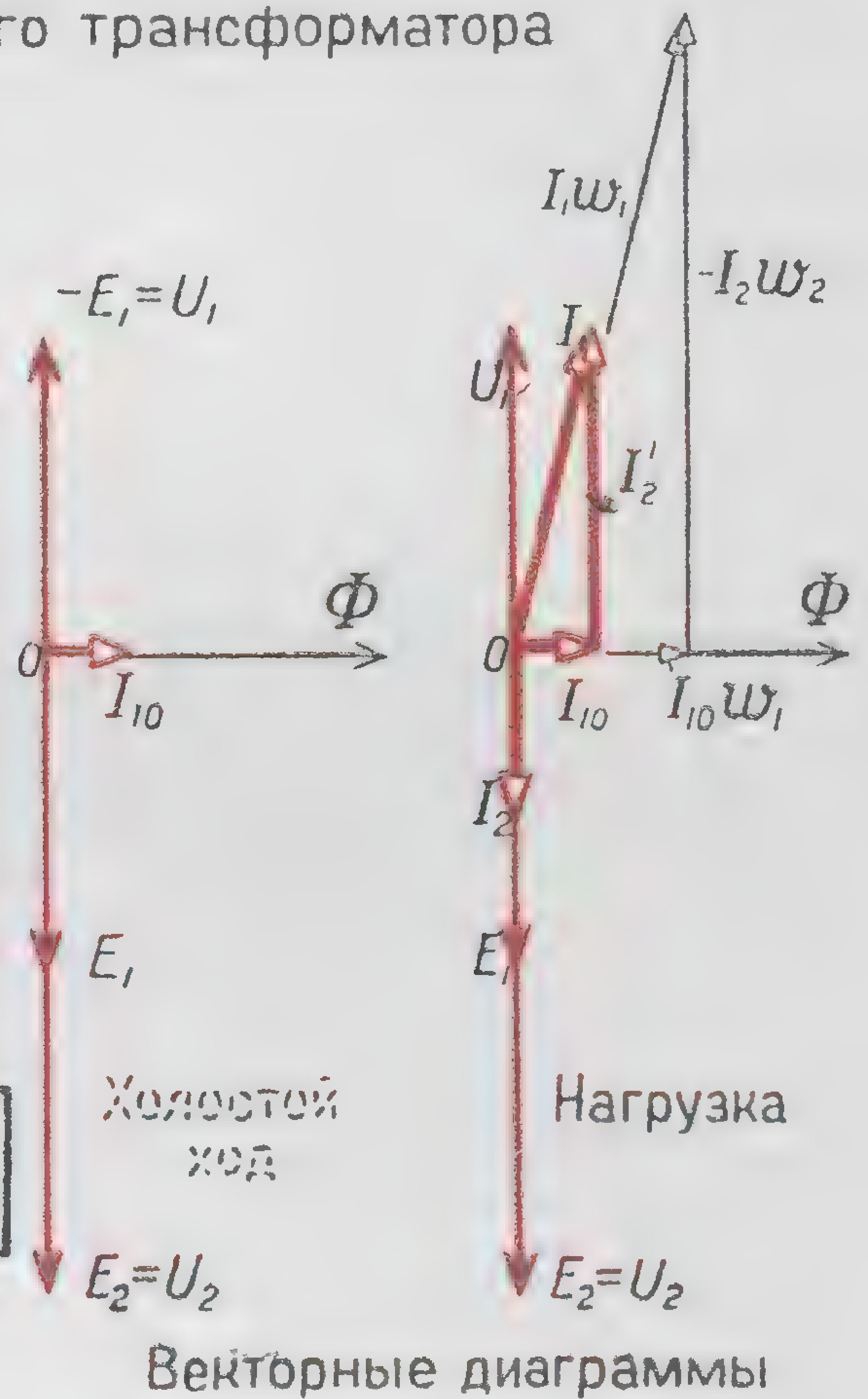


Схема трансформатора



$$\frac{E}{w} = 4{,}44 f \Phi_{макс} \text{ в}$$

Число вольт на виток

$$K_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Коэффициент трансформации

Векторные диаграммы

$$I_{10} = I_\mu = \frac{\Sigma H_м \, l_{ст}}{w_1 \sqrt{2}} \text{ a}$$

Первичный ток холостого хода

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{10} w_1 = const \text{ a}$$

„Баланс" ампервитков при нагрузке

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2' \text{ a}$$

Первичный ток при нагрузке

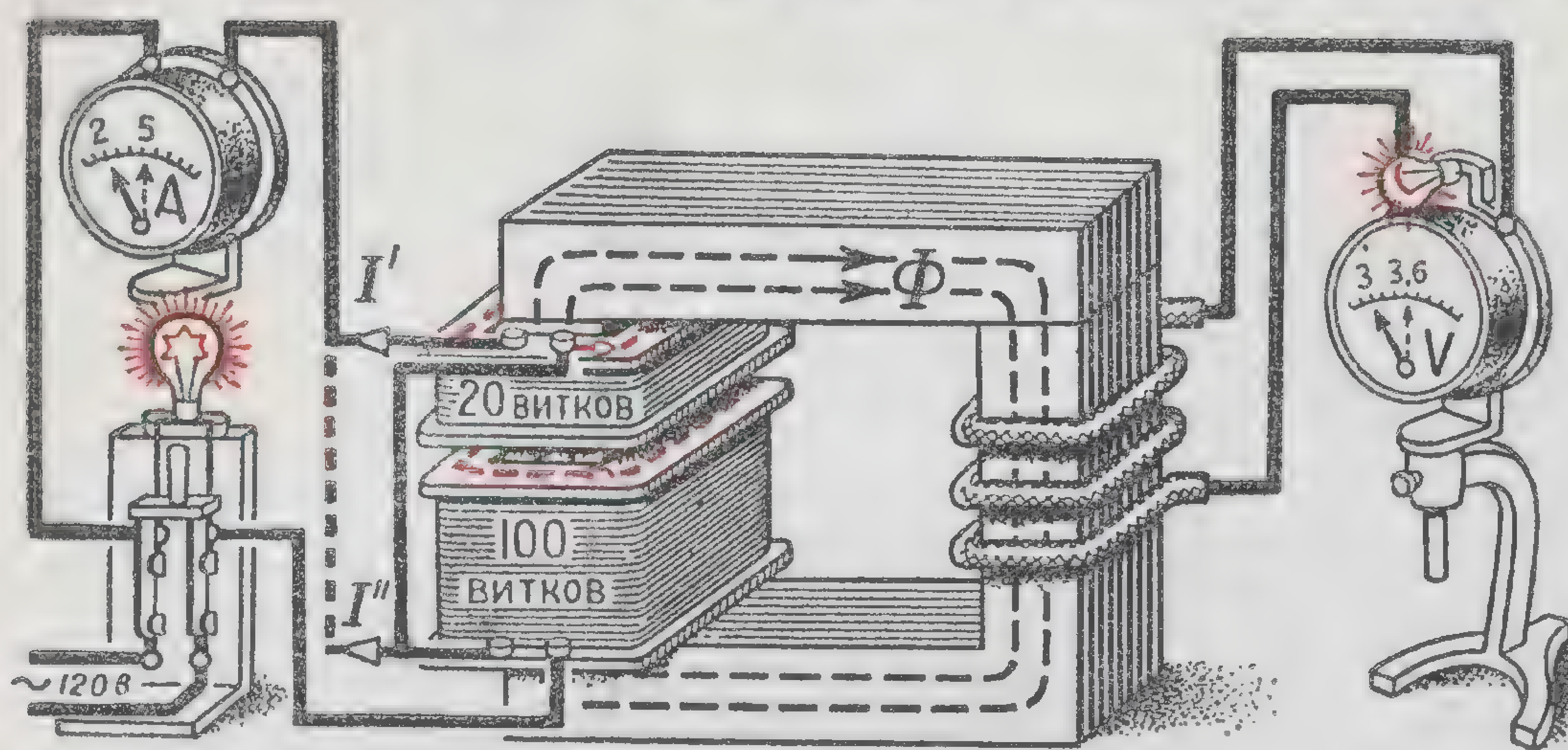
При нагрузке трансформатора ($I_2 > 0$) в первичной обмотке появляется дополнительный ток I_2', компенсирующий размагничивающее действие вторичного тока I_2

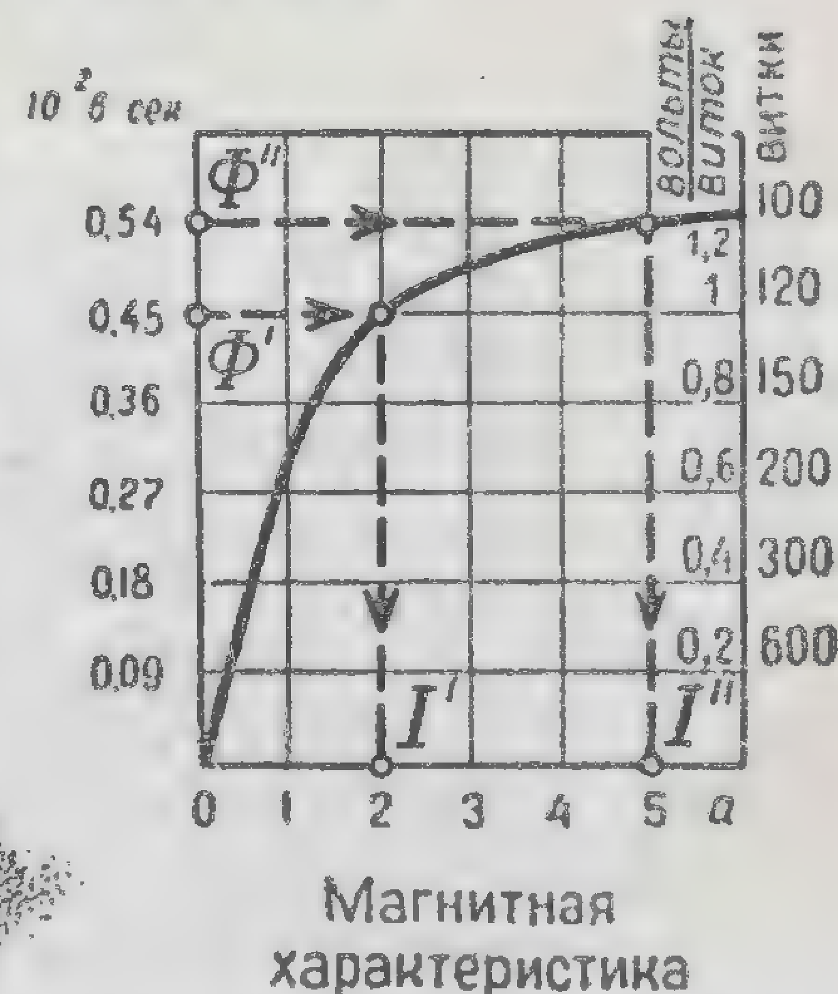
Трансформатор изобретен П.Н. Яблочковым в 1876 г.

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

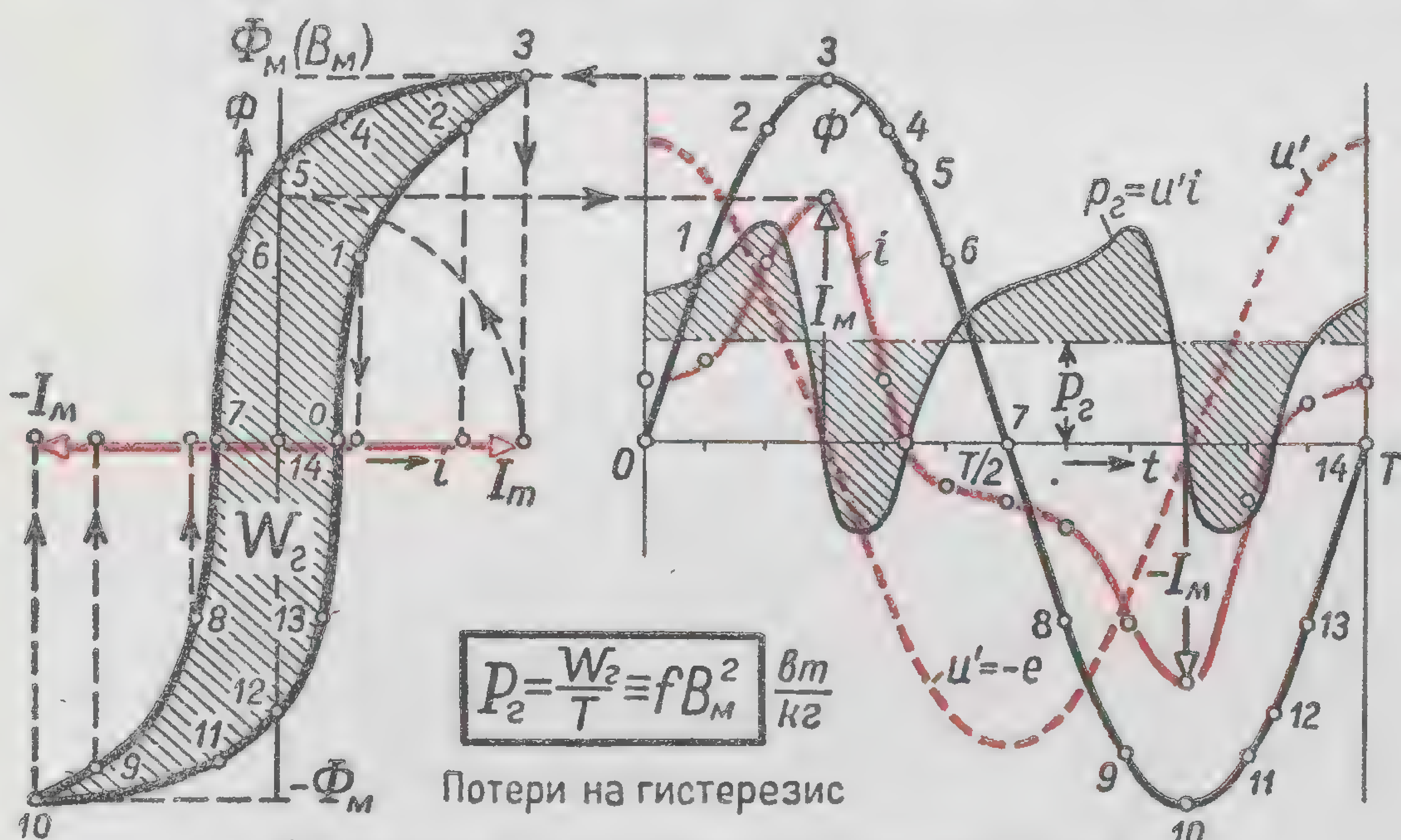
ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩИЕ СТАЛЬ





Магнитная характеристика

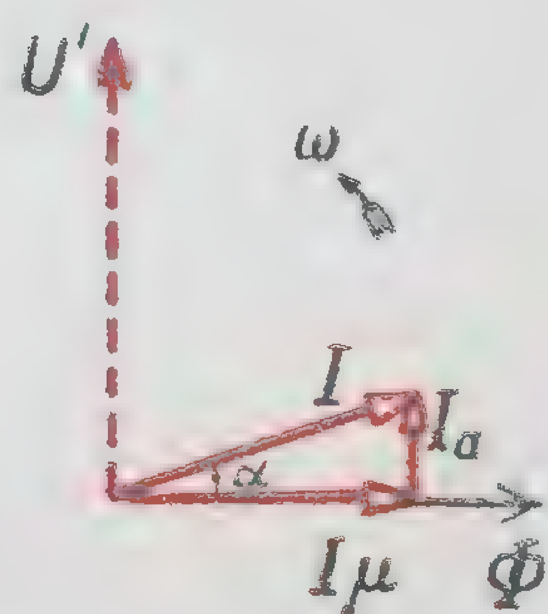
Возрастание магнитного потока и намагничивающего тока с уменьшением числа витков



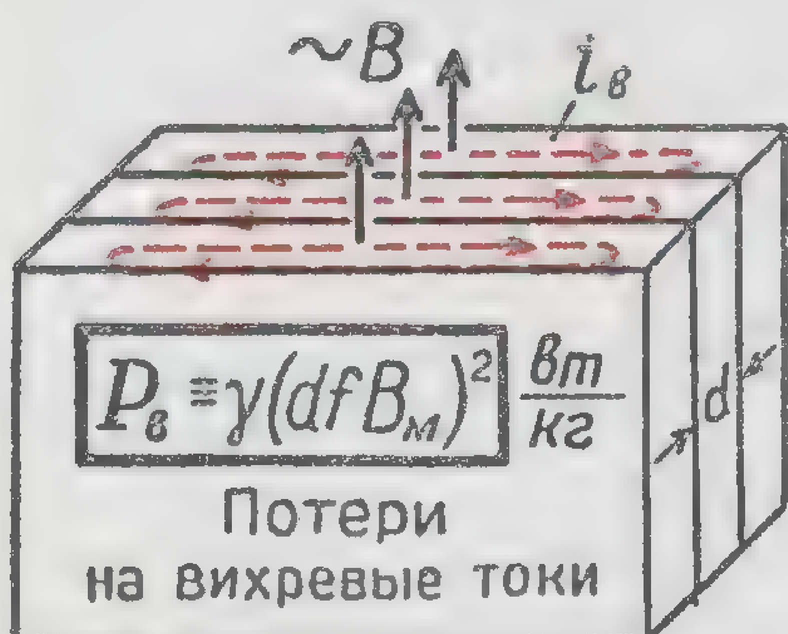
$P_г = \frac{W_г}{T} \equiv fB_м^2$ вт/кг

Потери на гистерезис

Искажение намагничивающего тока



Векторная диаграмма эквивалентной синусоиды



$P_в \equiv \gamma (dfB_м)^2$ вт/кг

Потери на вихревые токи

$P_{ст} = P_г + P_в = \left[K_г \frac{f}{100} + K_в \left(\frac{f}{100}\right)^2\right]\left(\frac{B_м}{10000}\right)^2$ вт/кг

Потери в стали на гистерезис и вихревые токи



Изменение коэффициента амплитуды

$I_\mu = \frac{I_м}{K_A}$ а

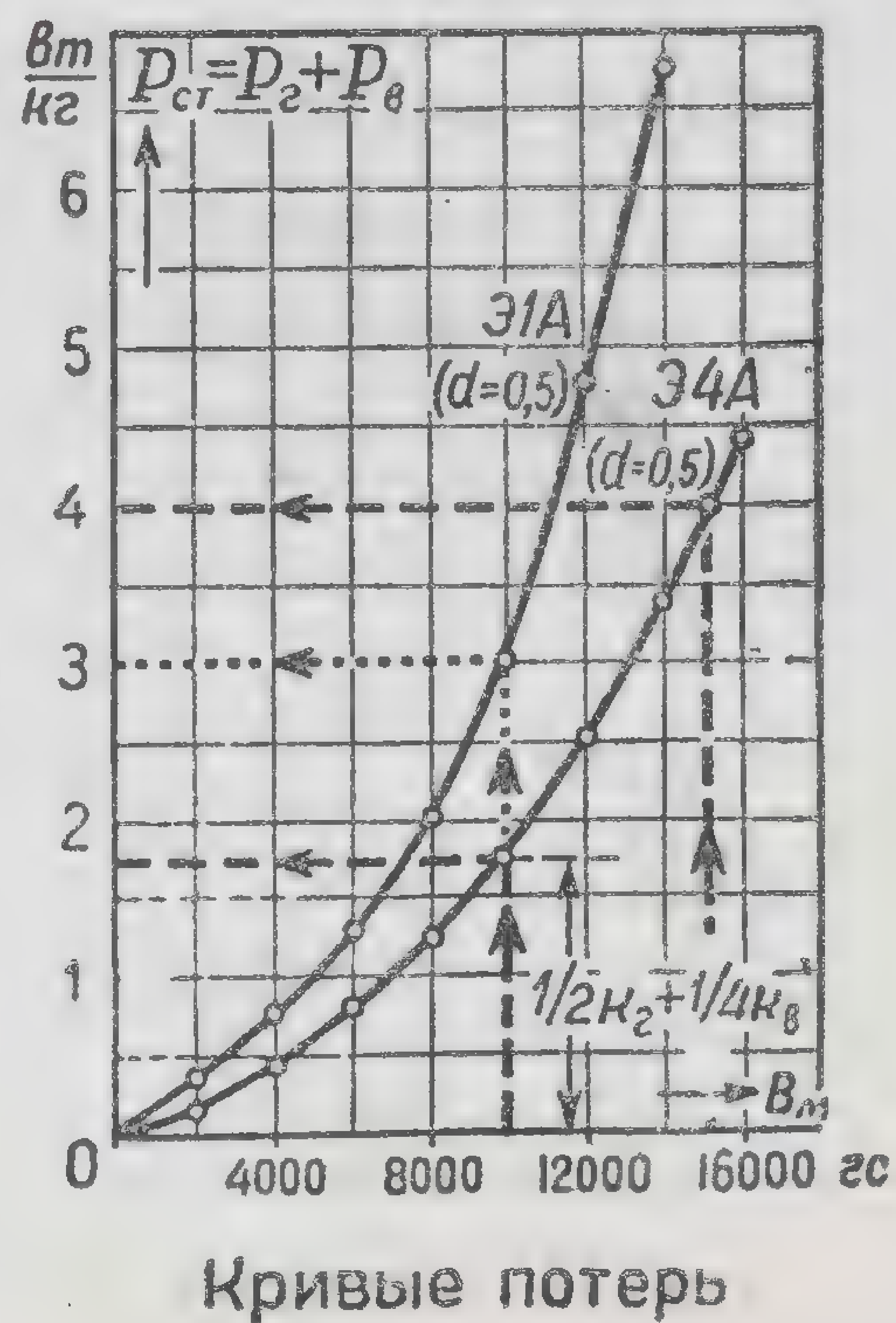
Реактивная (намагничивающая) слагающая

$I_a = \frac{P_{ст}}{U'}$ а

Активная слагающая

$I = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2}$ а

Эквивалентный синусоидальный ток

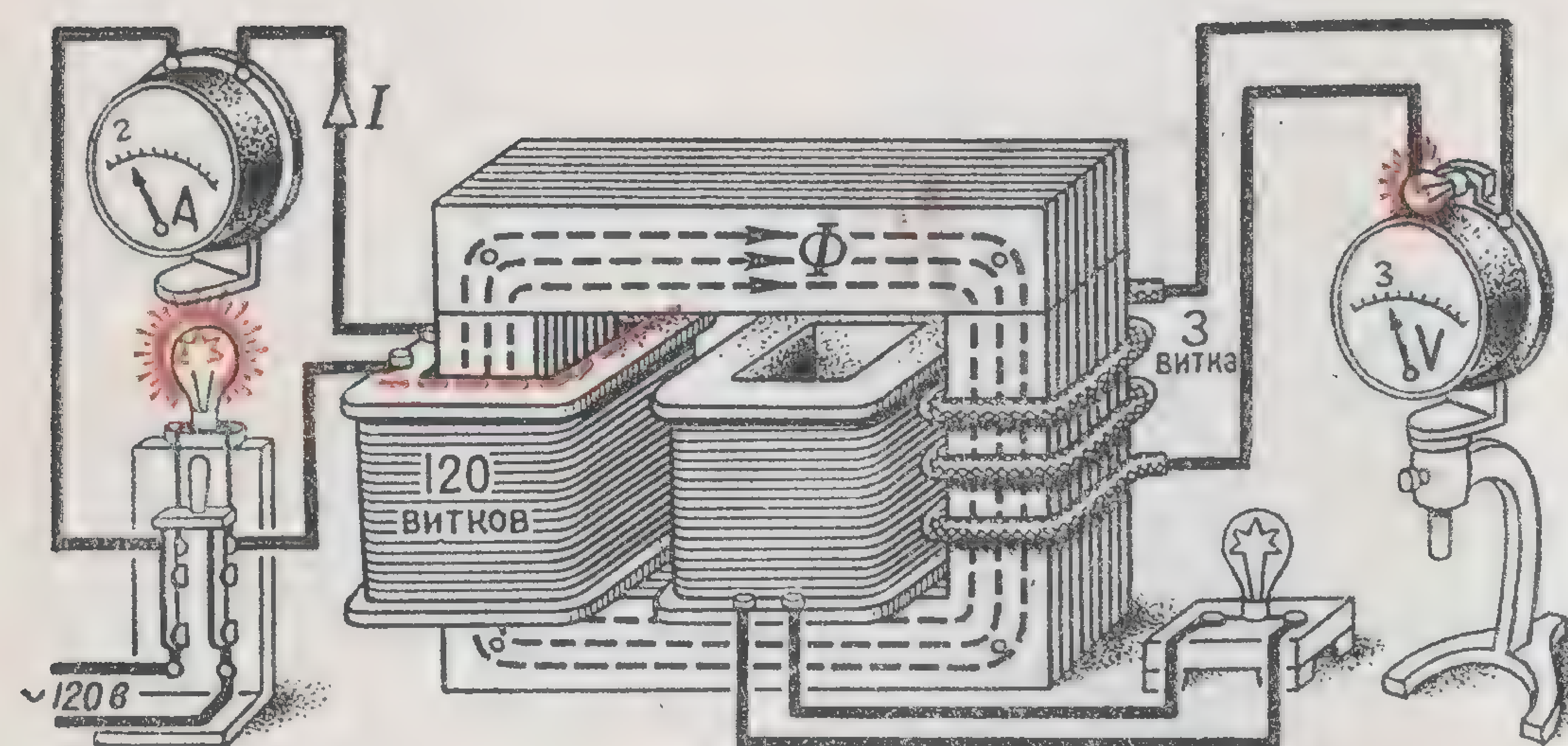


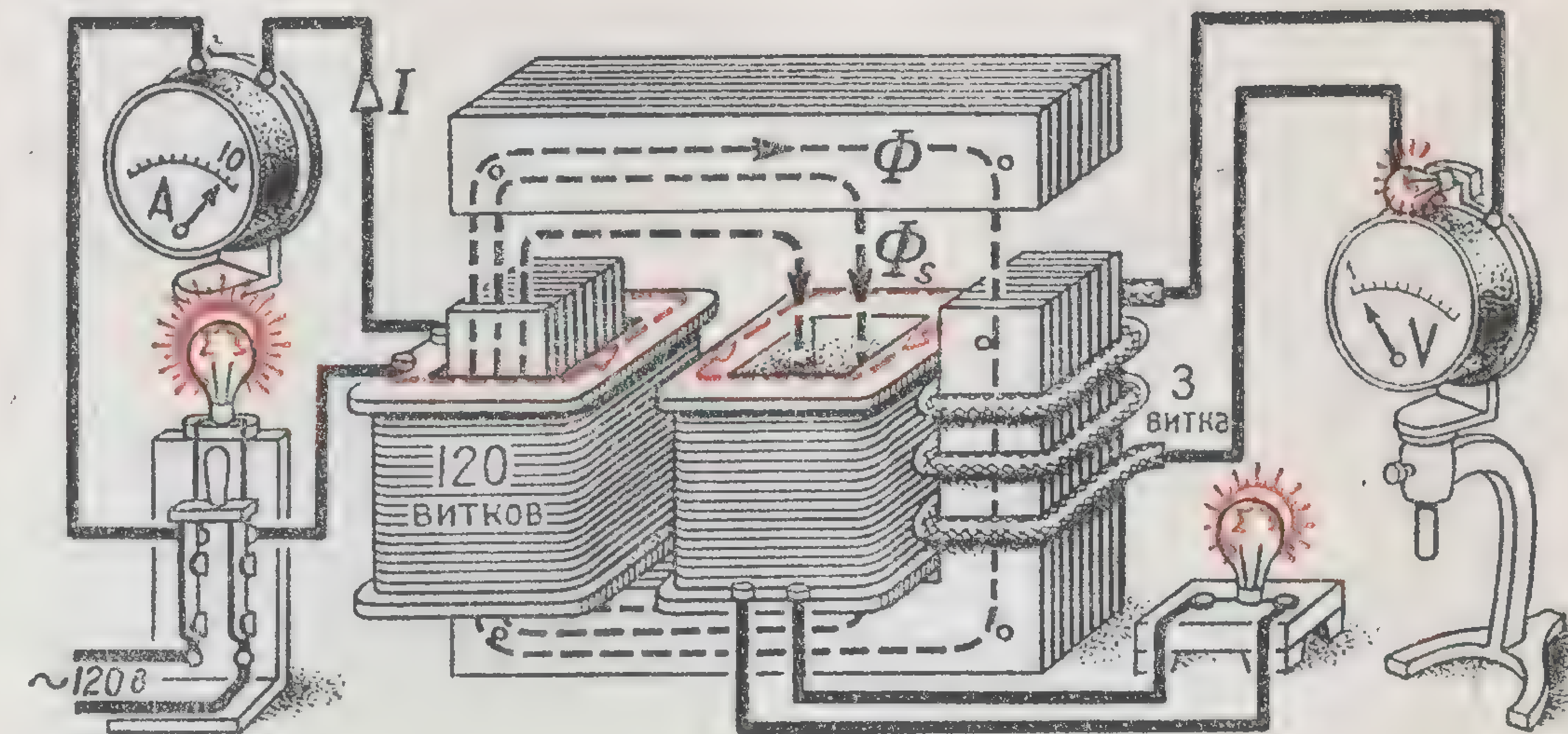
Кривые потерь

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

РЕАКТИВНАЯ КАТУШКА





Возрастание намагничивающего тока и потока рассеяния реактивной катушки с увеличением воздушного зазора

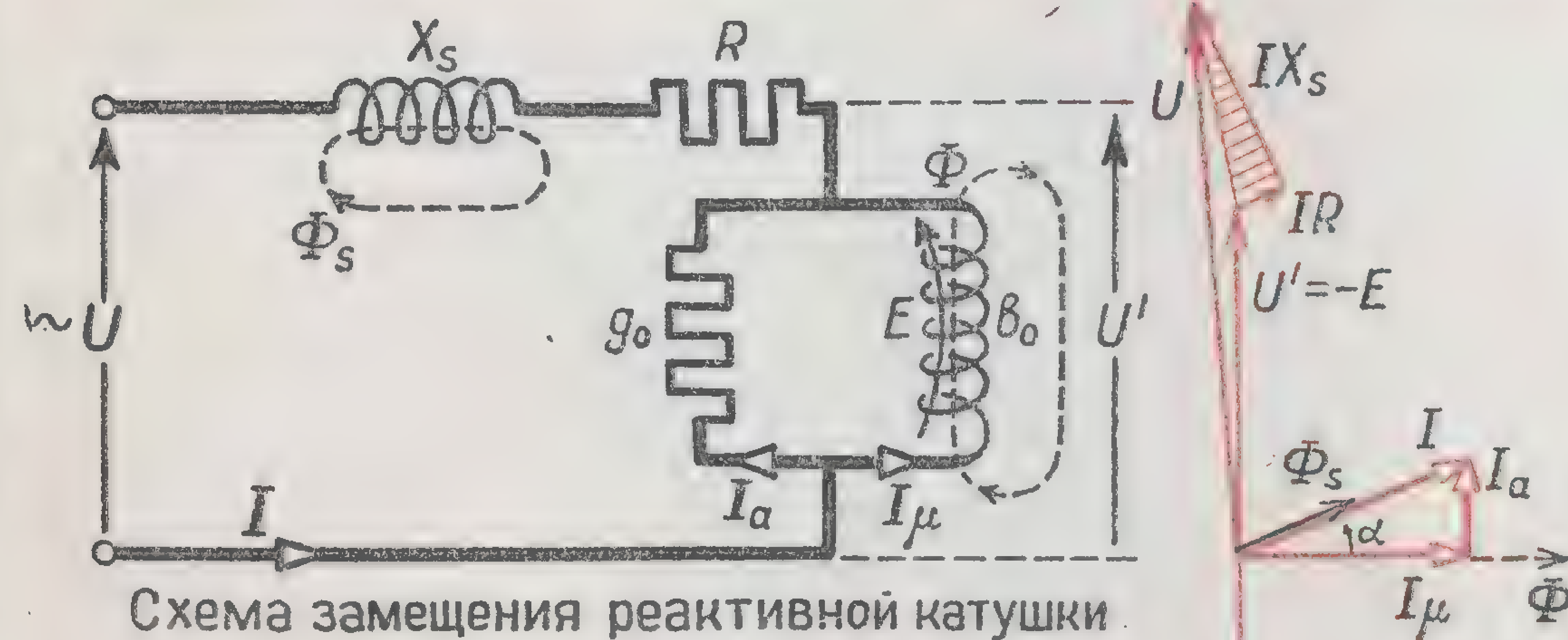
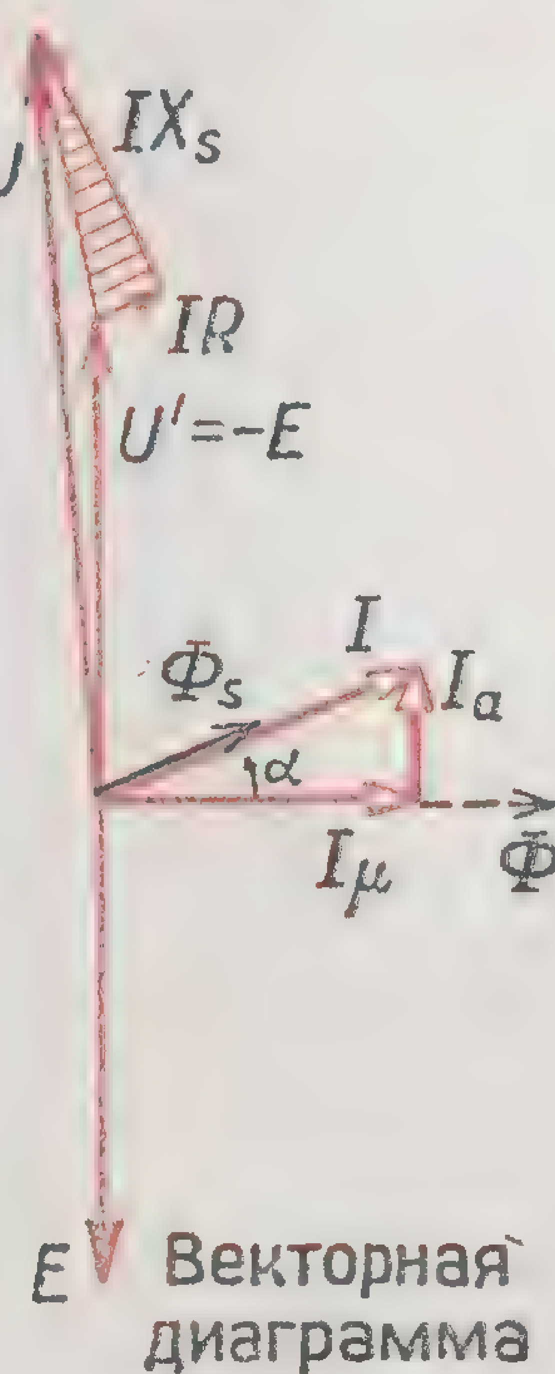


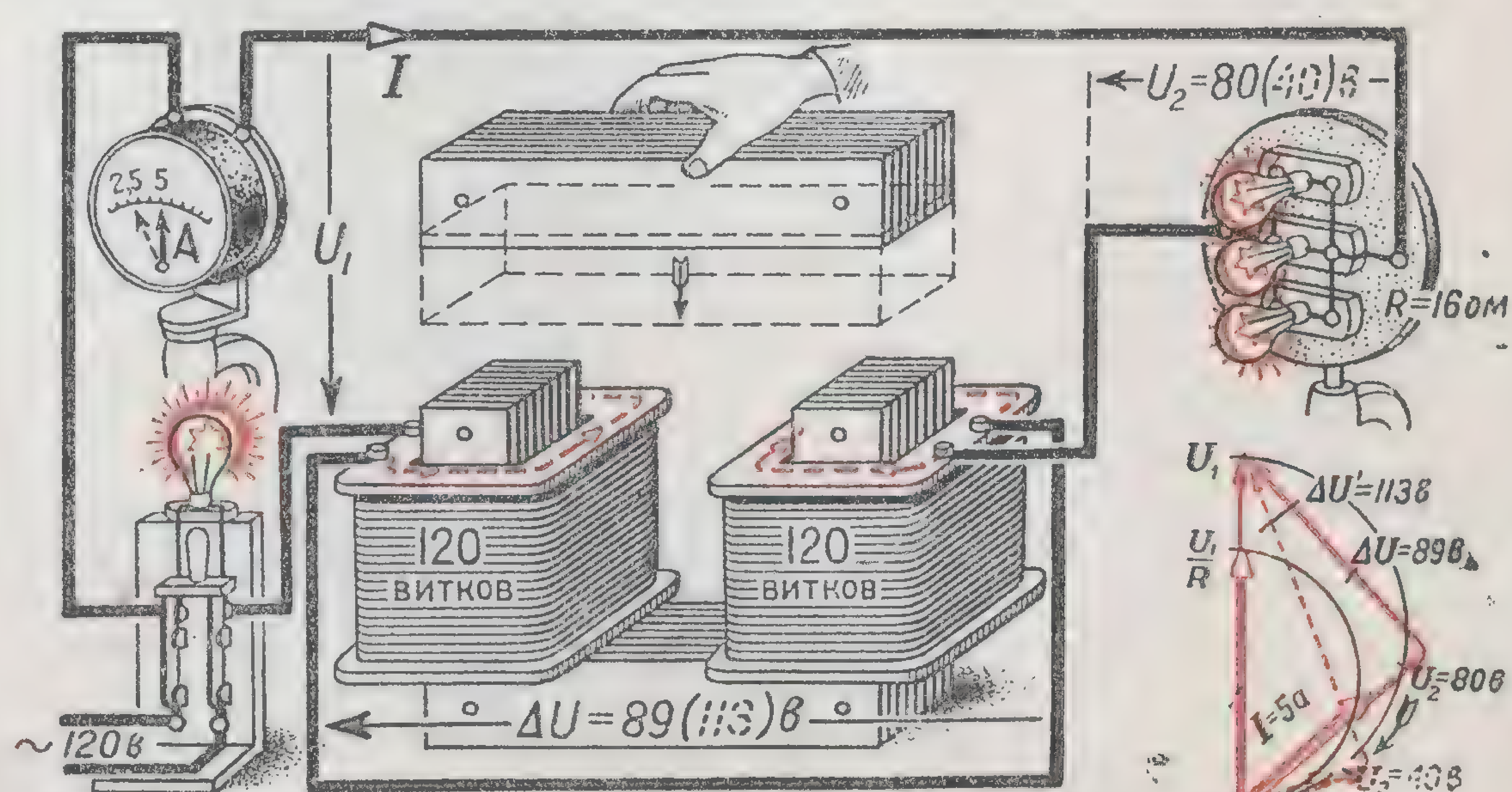
Схема замещения реактивной катушки



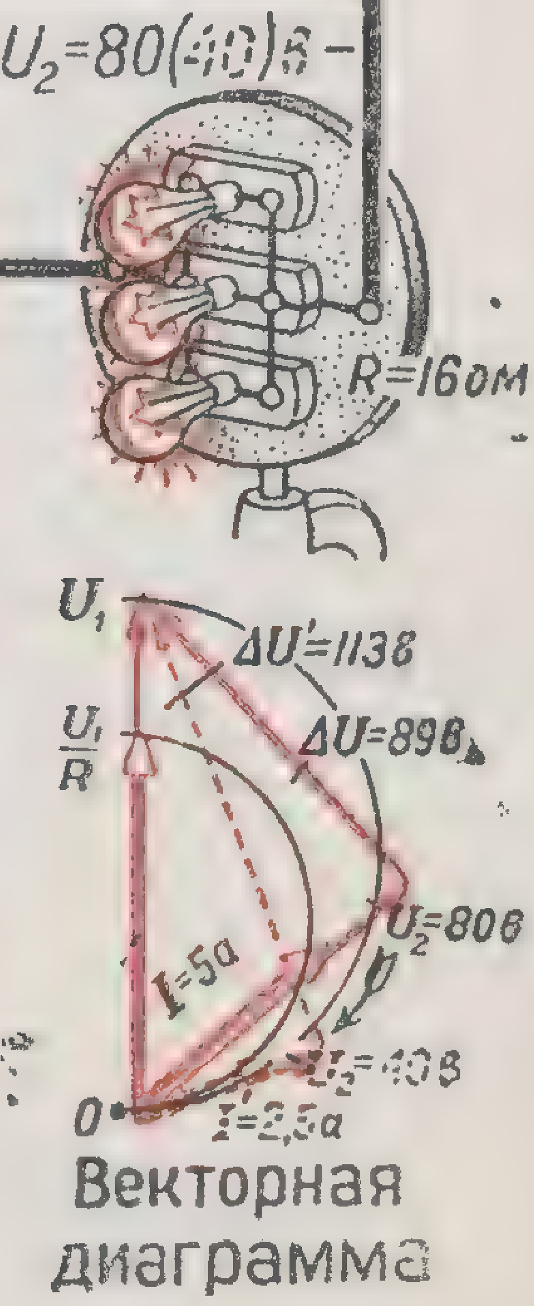
Векторная диаграмма

$$g_o = \frac{I_a}{U'} = \frac{P_{ст}}{U'^2} \ \frac{1}{ом} \qquad b_o = \frac{I_\mu}{U'} \ \frac{1}{ом}$$

Активная и реактивная проводимости



Понижение напряжения на лампах при помощи реактивной катушки (дросселя)

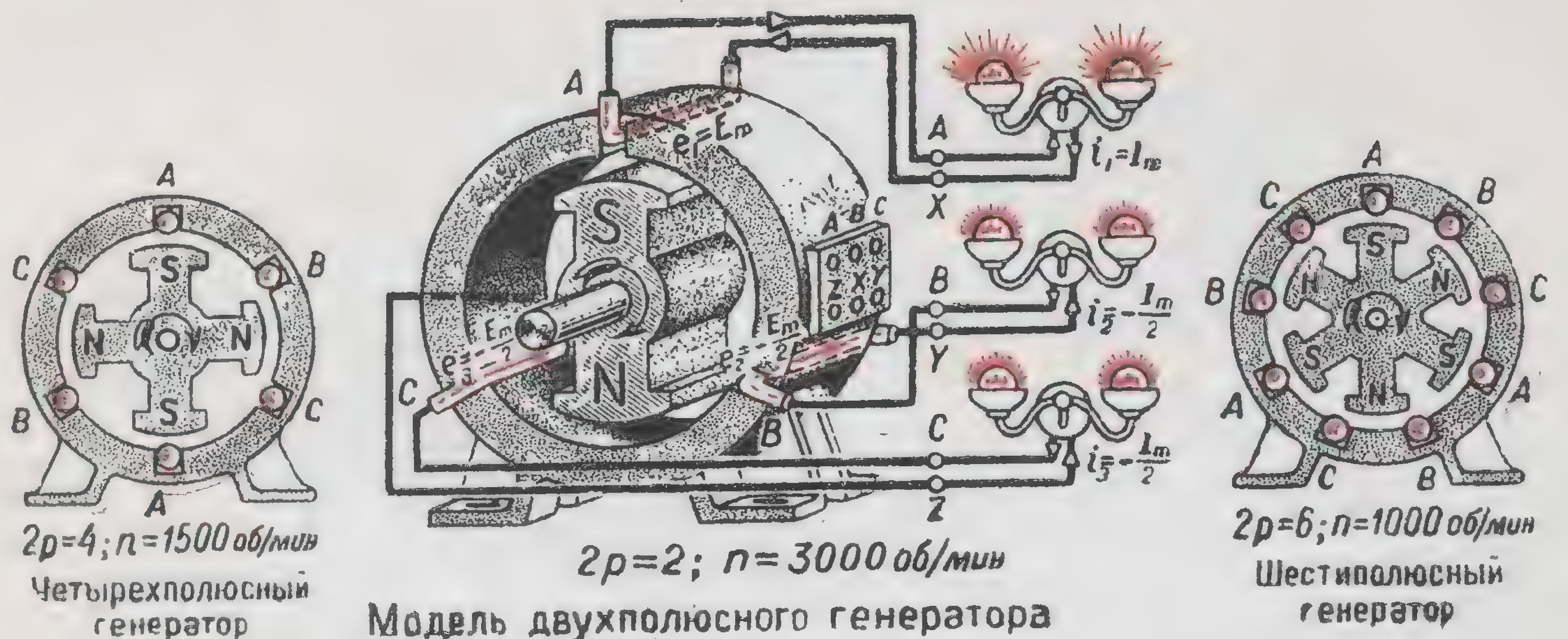


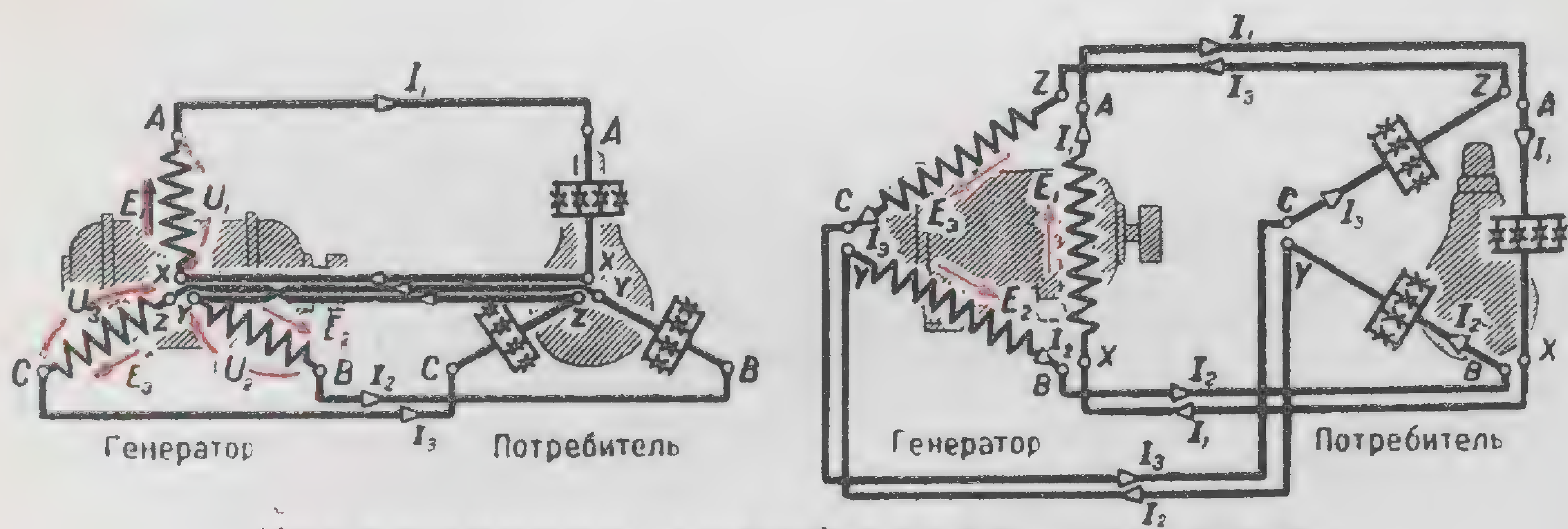
Векторная диаграмма

Э.И. Расовский

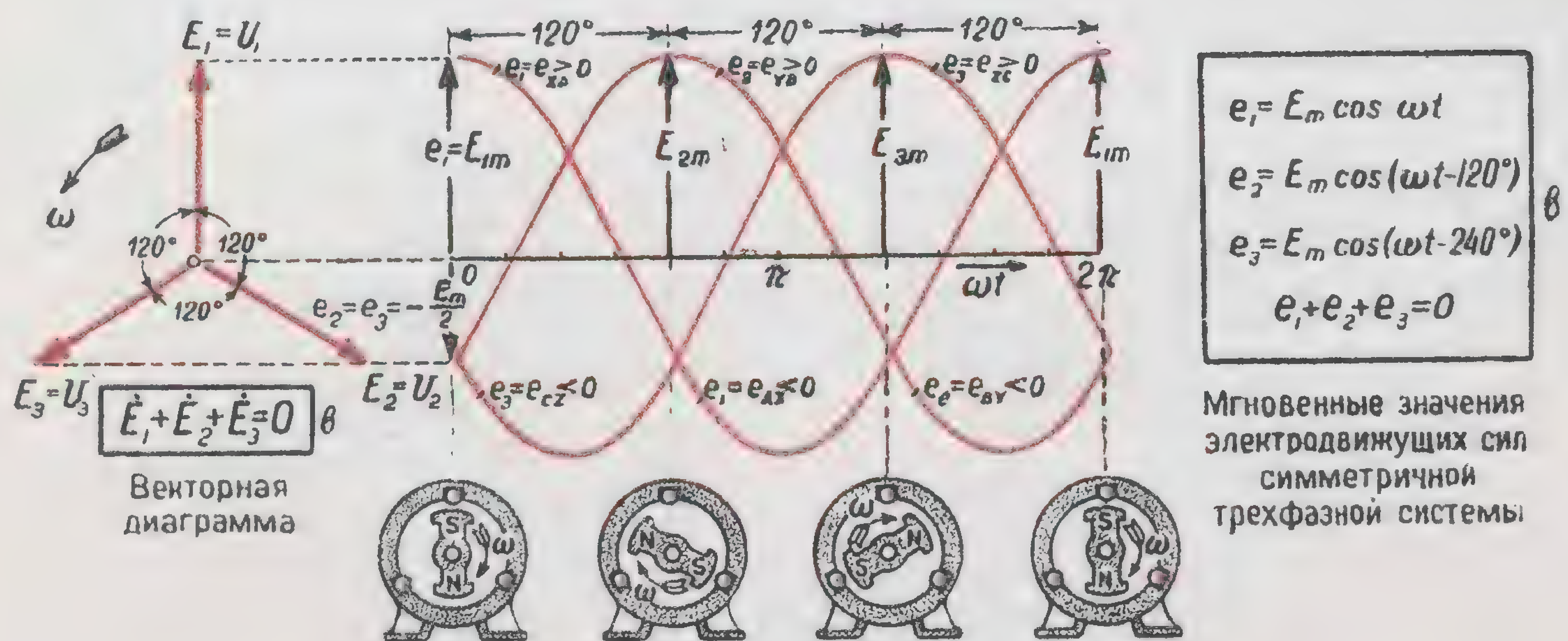
Худ. А. Меньшиков

ПРОСТЕЙШИЙ ГЕНЕРАТОР ТРЕХФАЗНОГО ТОКА





Несвязанная трехфазная система



Кривые электродвижущих сил

Основоположником техники трехфазного тока является М. О. Доливо-Добровольский

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА.

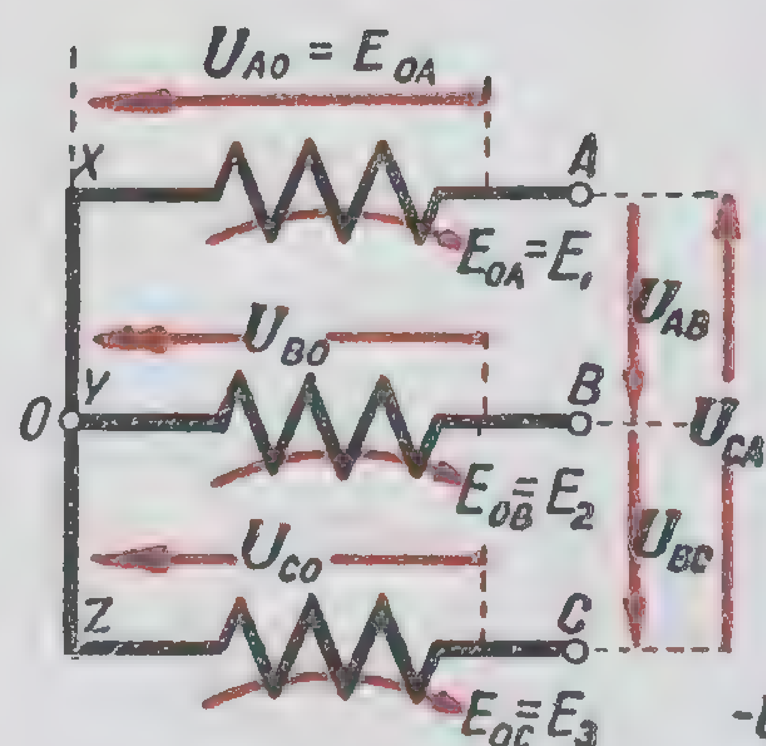
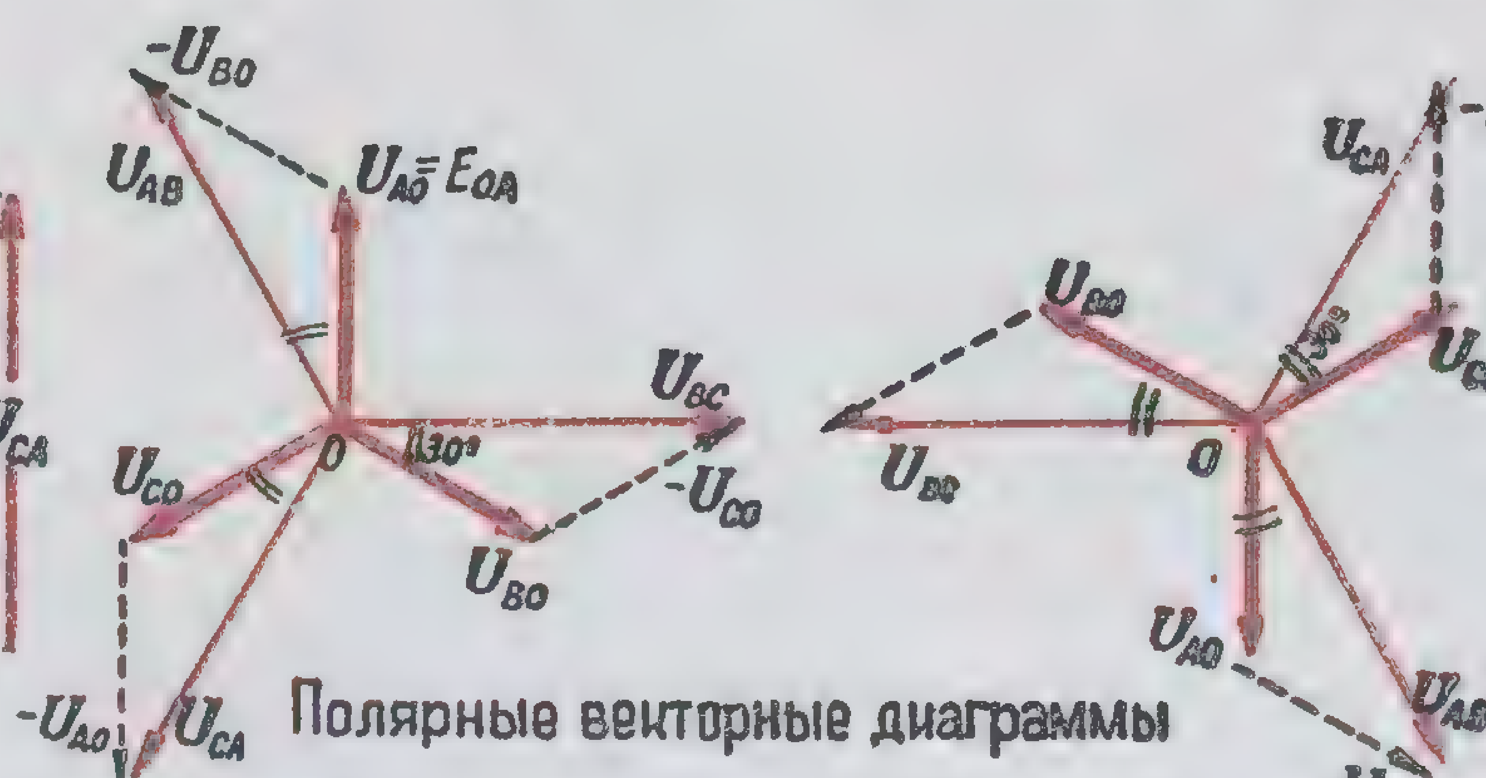


Схема соединения обмоток генератора звездой



Полярные векторные диаграммы

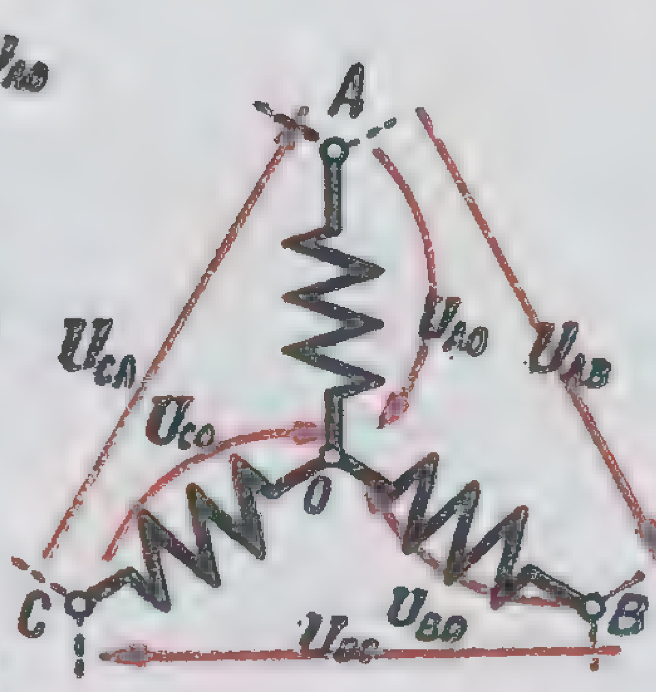


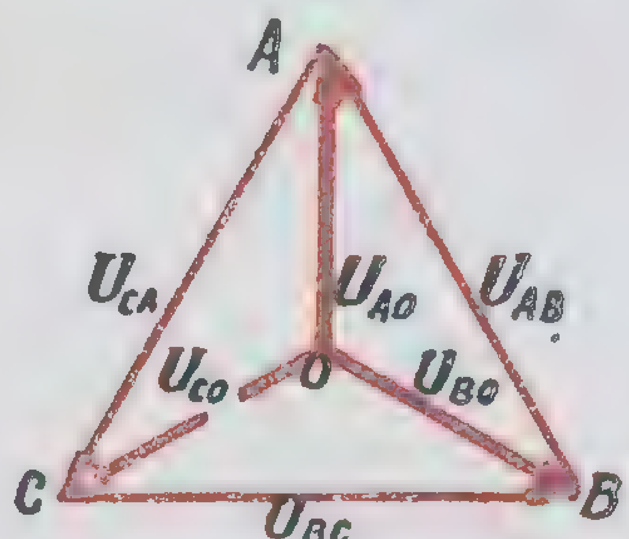
Схема соединения обмоток генератора звездой

$\dot{U}_{AO} = \dot{E}_{OA}; \ \dot{U}_{BO} = \dot{E}_{OB}; \ \dot{U}_{CO} = \dot{E}_{OC}$ в

Фазовые напряжения генератора при холостом ходе

$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AO} - \dot{U}_{BO}; \ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BO} - \dot{U}_{CO}; \ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CO} - \dot{U}_{AO}$ в

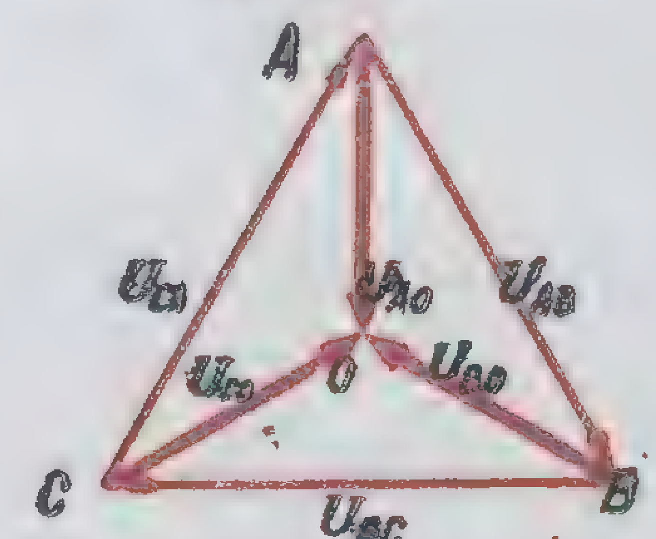
Линейные напряжения



Топографическая векторная диаграмма напряжений (классическая)

$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ в

Векторы линейных напряжений образуют замкнутый треугольник



Топографическая векторная диаграмма напряжений (рационализированная)

Соединение генератора звездой.

(соединение концов X Y Z трех обмоток, фаз, в одну общую точку — нейтраль)

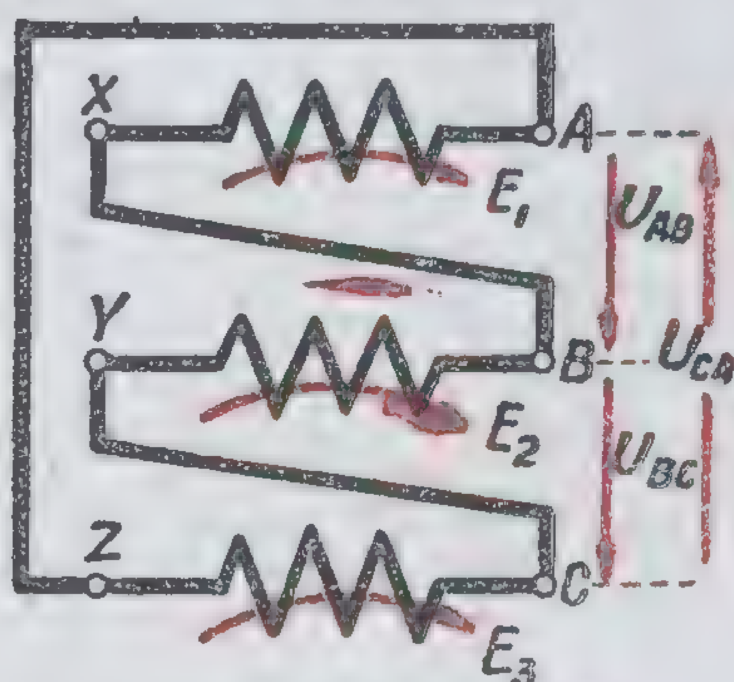
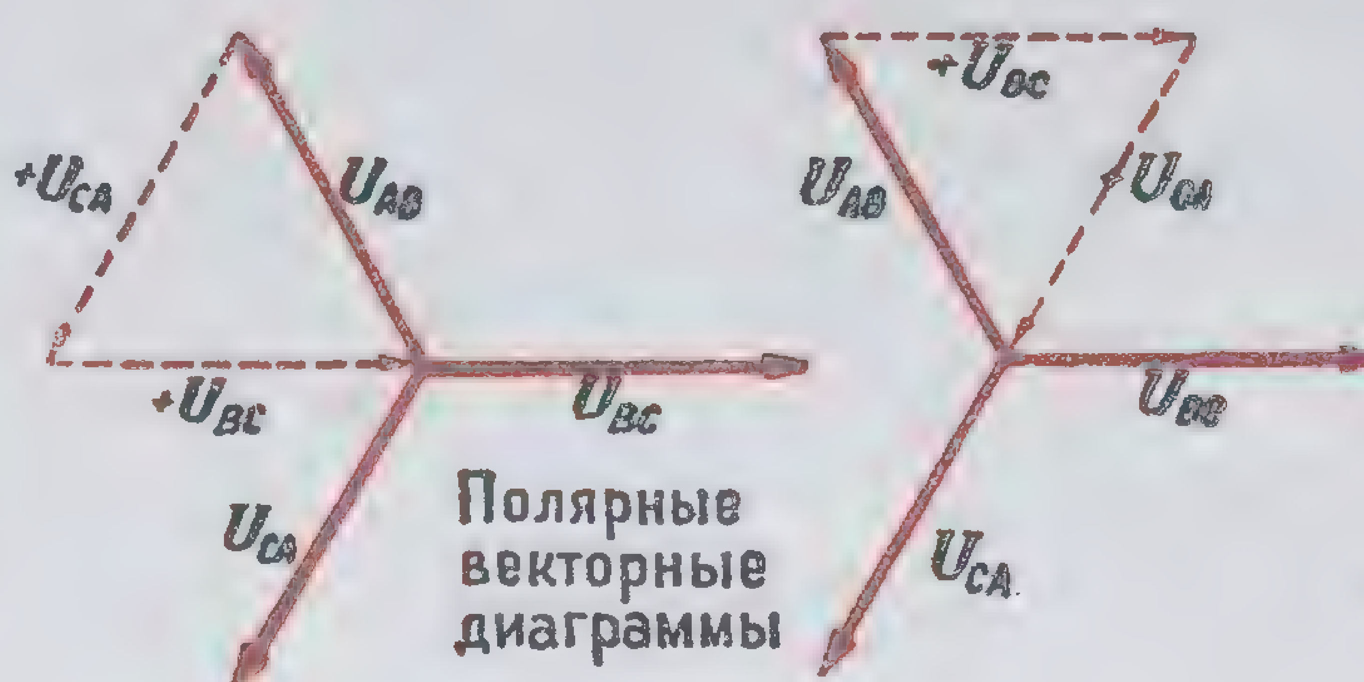


Схема соединения обмоток генератора треугольником



Полярные векторные диаграммы

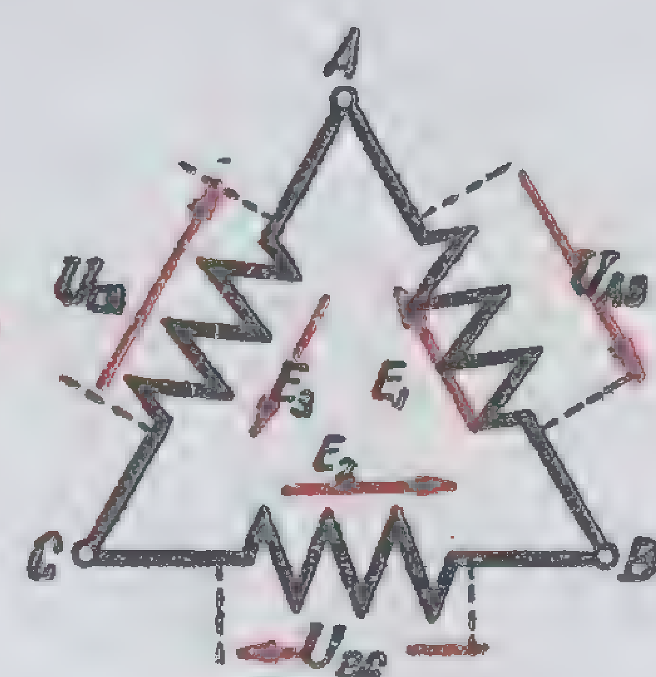
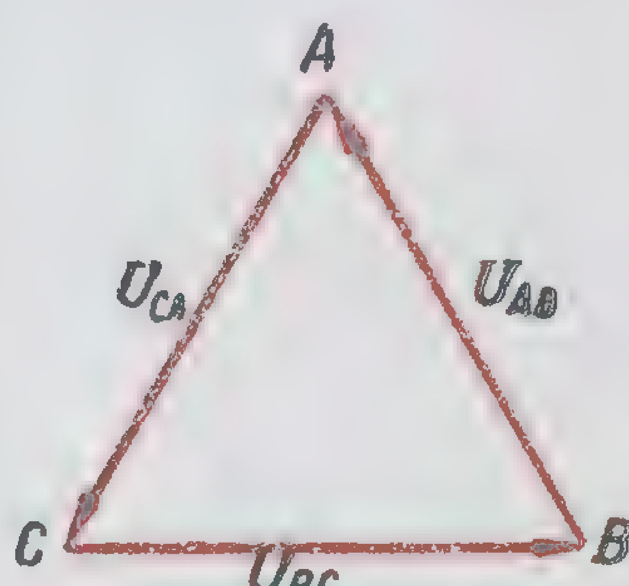


Схема соединения обмоток генератора треугольником

$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = 0$ в

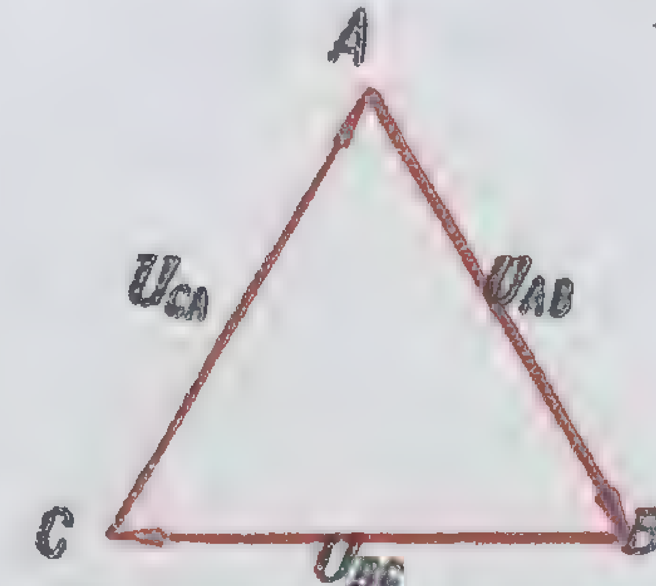
В симметричном генераторе, соединенном треугольником, сумма трех его э.д.с. равна нулю и при отсутствии нагрузки тока в нем не будет.



Топографическая векторная диаграмма напряжений (классическая)

$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ в

Векторы линейных напряжений образуют замкнутый треугольник.



Топографическая векторная диаграмма напряжений (рационализированная)

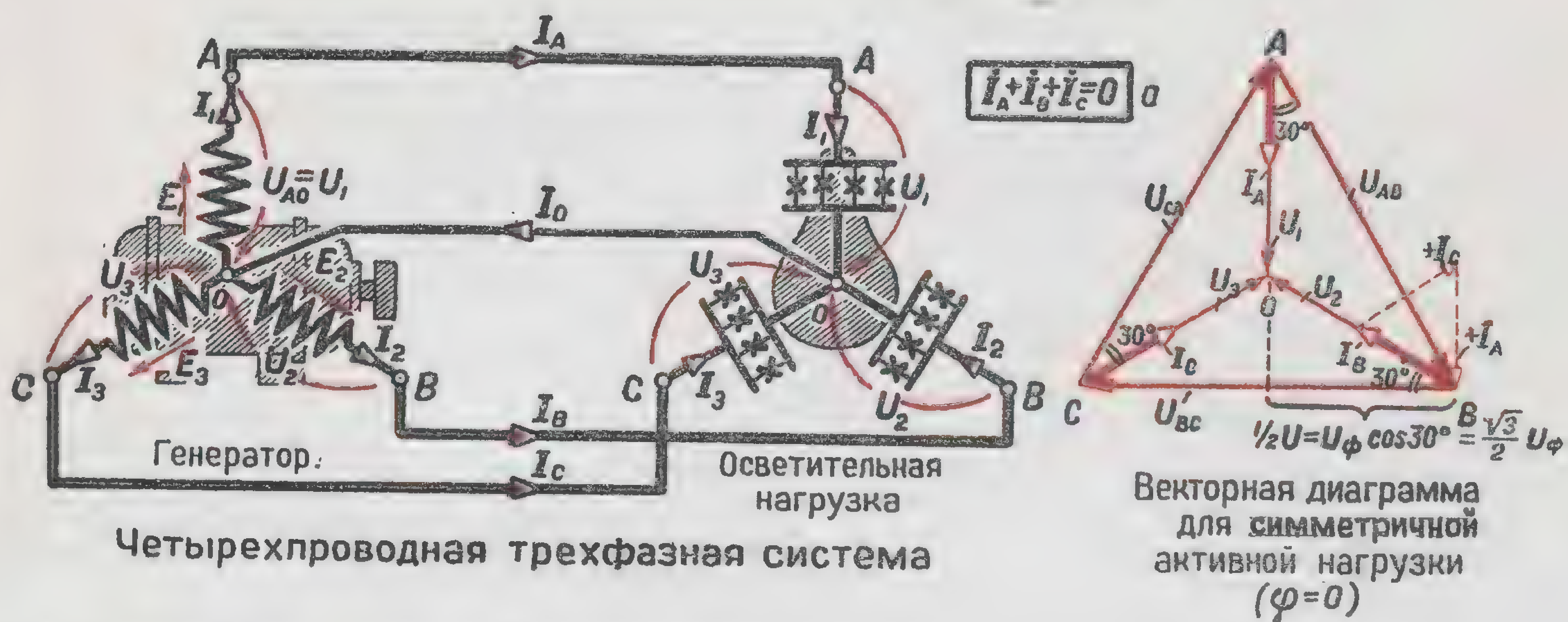
Соединение генератора треугольником

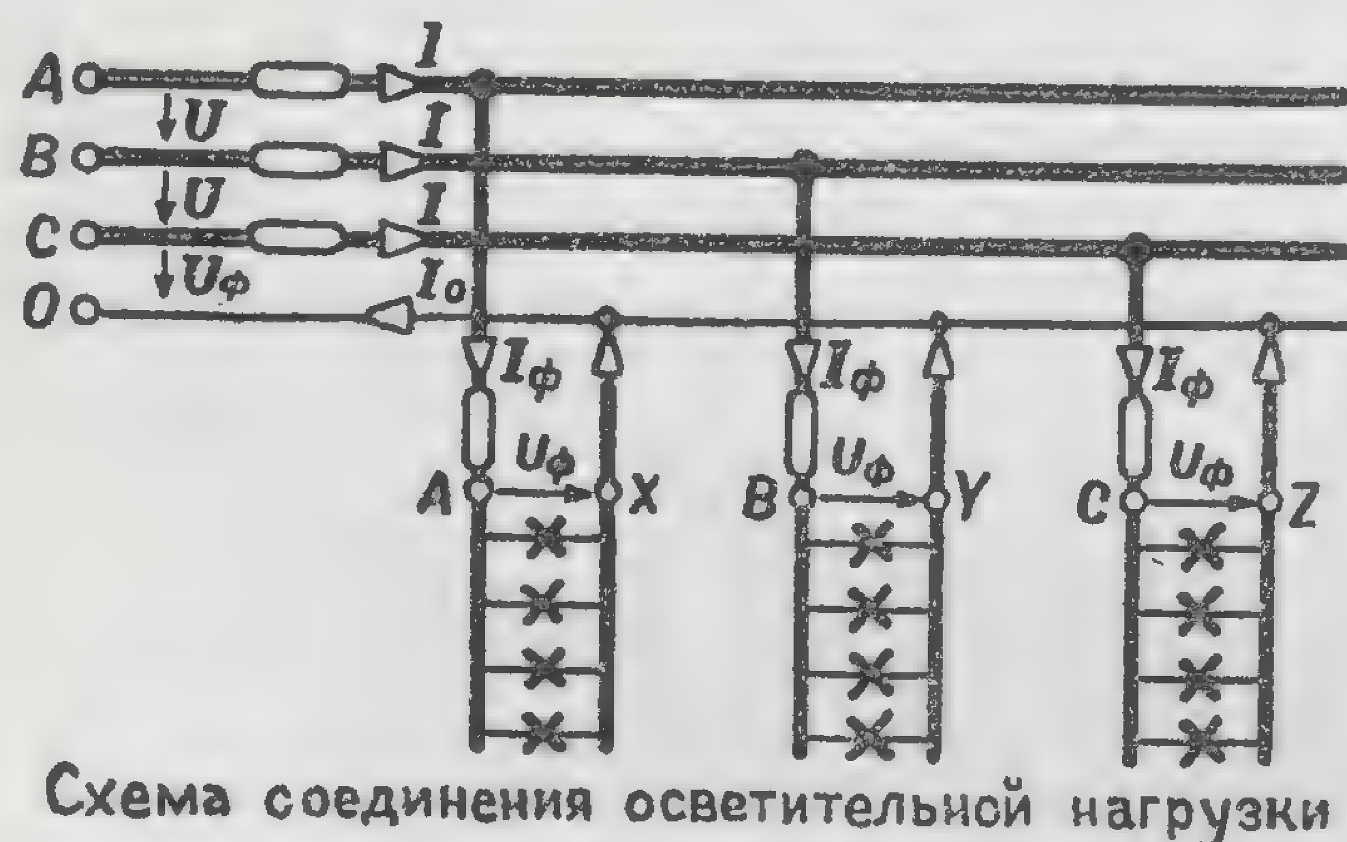
(соединение трех обмоток, фаз, в замкнутую последовательную цепь)

Обмотки трехфазного генератора соединяются, как правило, звездой

Э.И. Расовский.

СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕЗДОЙ (⅄)




Схема соединения осветительной нагрузки

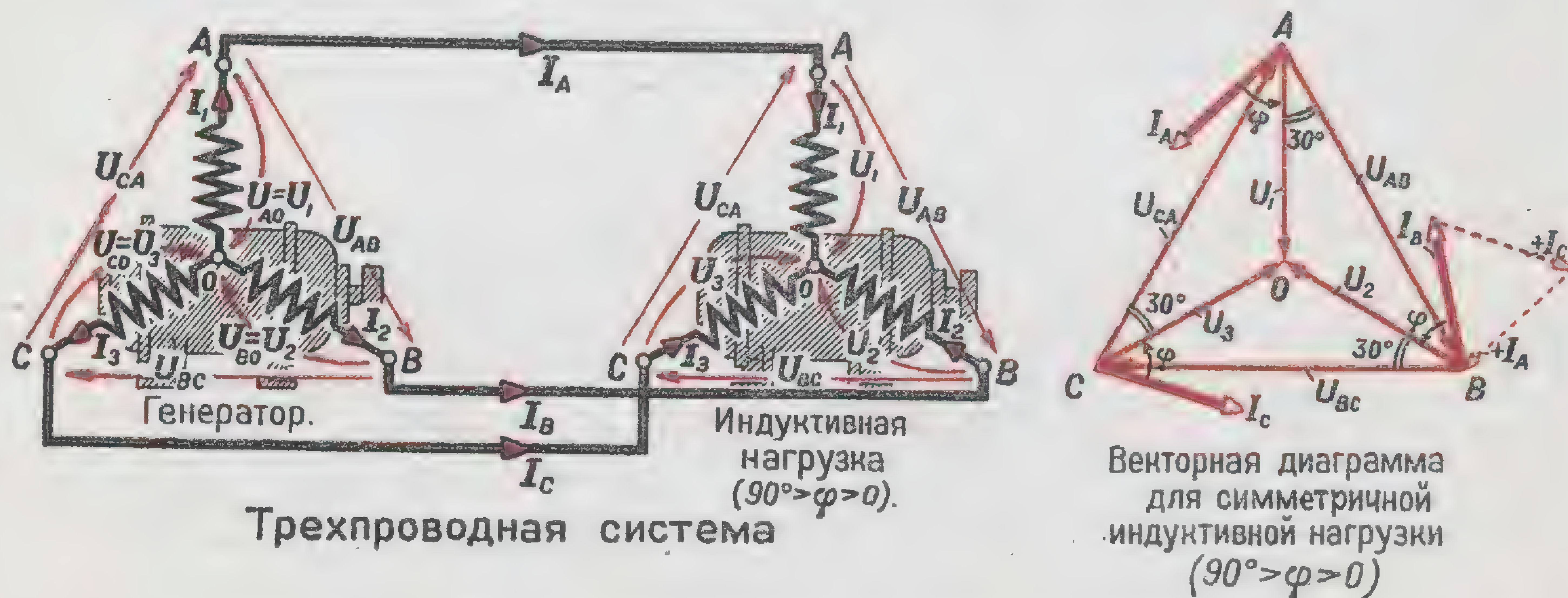
$\dot{I}_A=\dot{I}_1$; $\dot{I}_B=\dot{I}_2$; $\dot{I}_C=\dot{I}_3$ $(I=I_\phi)$; $\dot{I}_0=\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C$ a

$\dot{U}_{AB}=\dot{U}_{A0}-\dot{U}_{B0}$; $\dot{U}_{BC}=\dot{U}_{B0}-\dot{U}_{C0}$; $\dot{U}_{CA}=\dot{U}_{C0}-\dot{U}_{A0}$ в

Соотношения между линейными и фазовыми токами и напряжениями

При соединении звездой линейный ток (I) является фазовым (I_ϕ), а линейное напряжение (U) равно геометрической разности двух смежных фазовых напряжений (U_ϕ)

При симметричной нагрузке фаз ток в нулевом проводе отсутствует и надобность в этом проводе отпадает



$$U=\sqrt{3}\,U_\phi \quad в$$

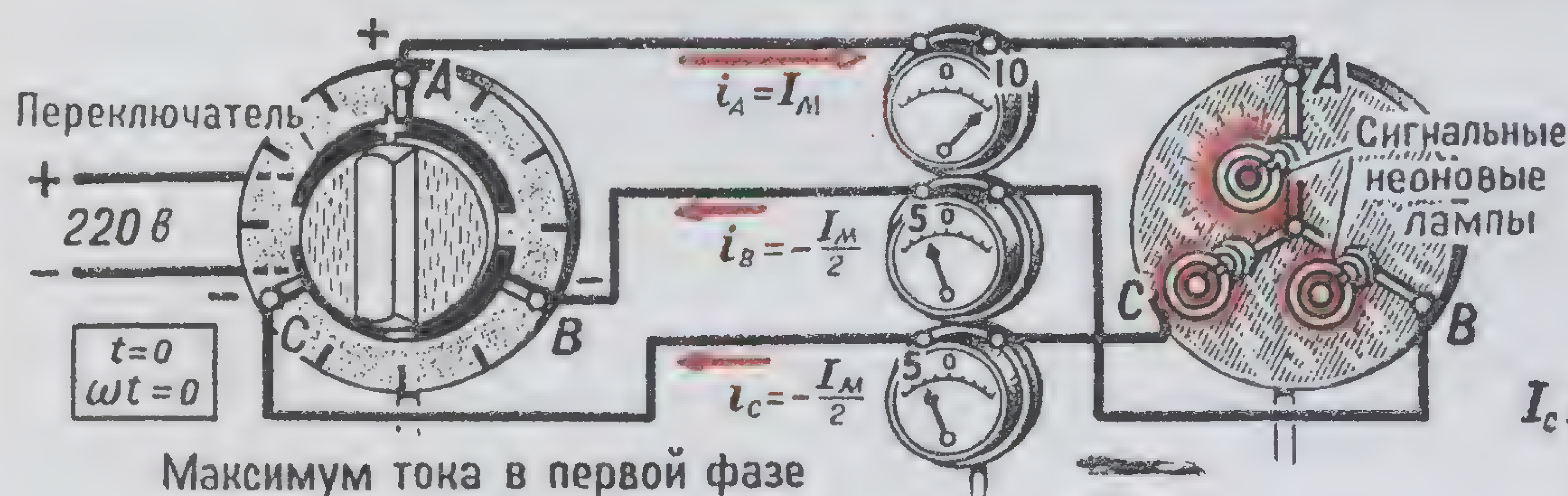
В симметричной системе, соединенной звездой, линейное напряжение больше фазового в $\sqrt{3}$ раз и опережает его по фазе на 30°

Э. И. Расовский

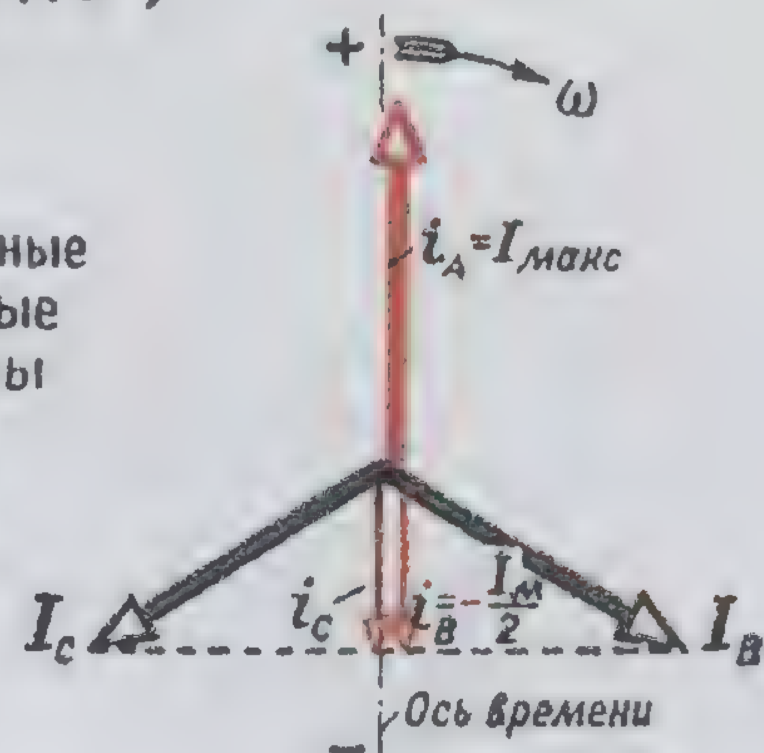
Худ. А. Меньшиков

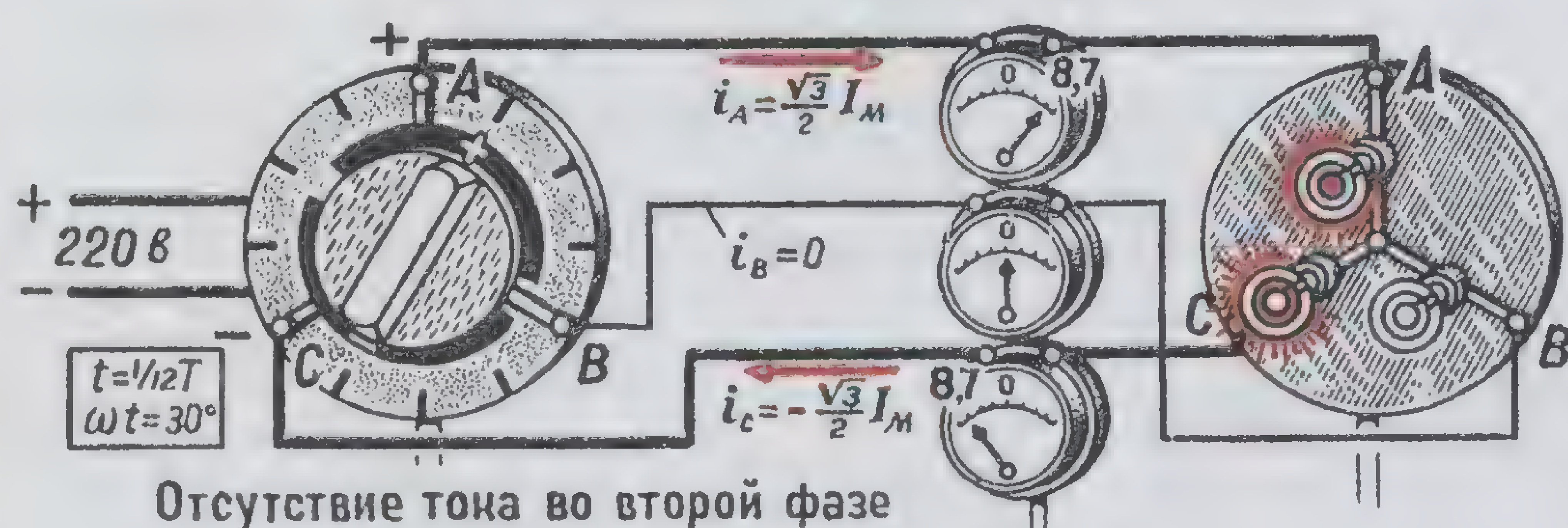
МГНОВЕННОЕ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕЗДОЙ

(демонстрационная установка)

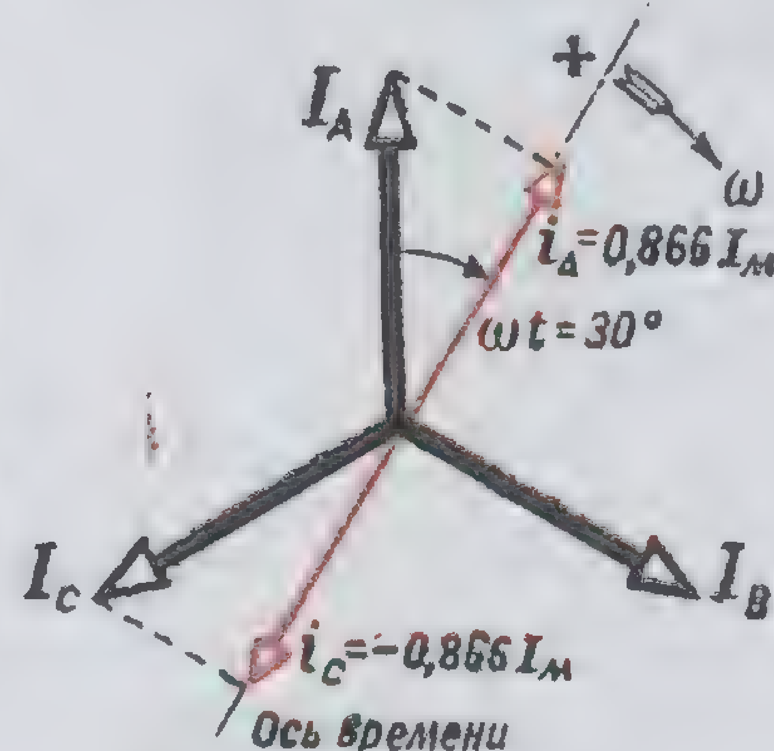


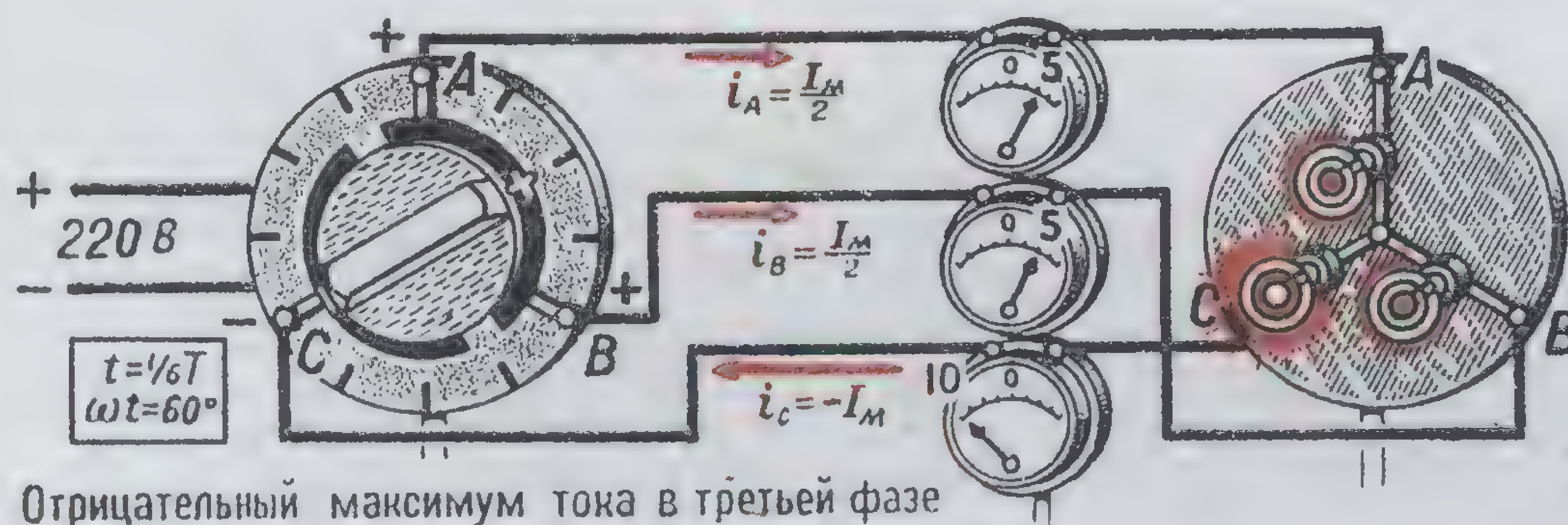
Максимум тока в первой фазе



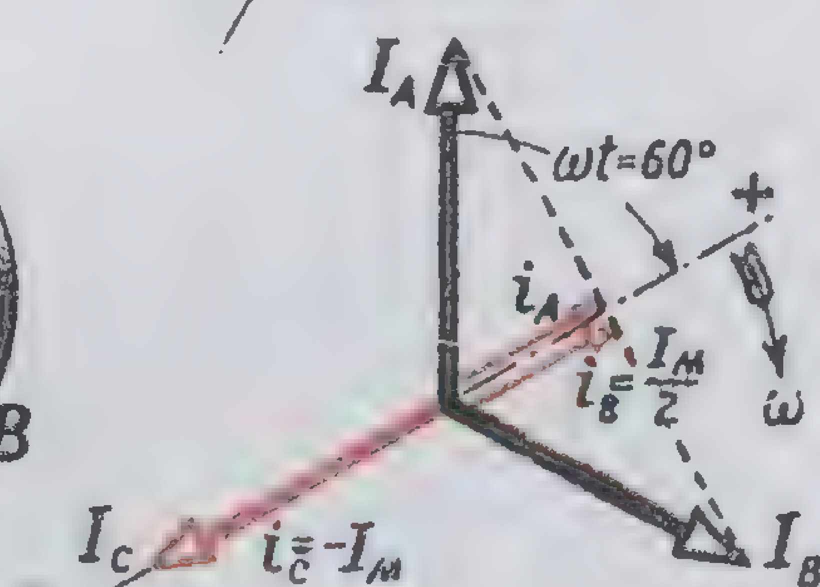


Отсутствие тока во второй фазе

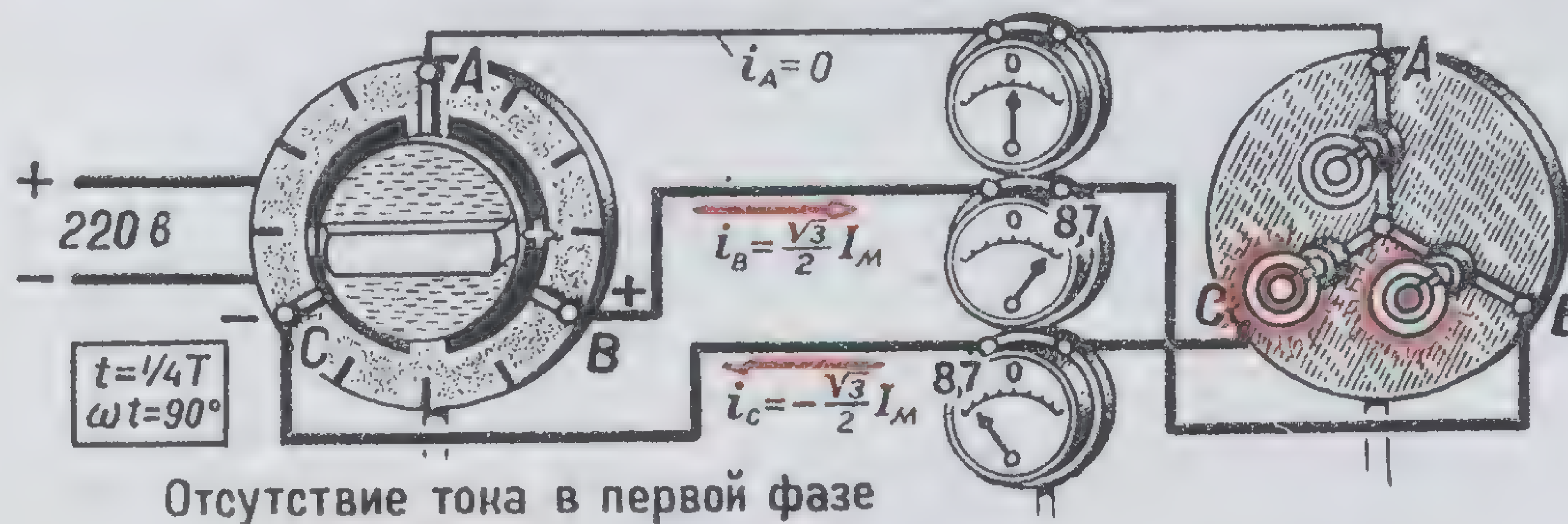




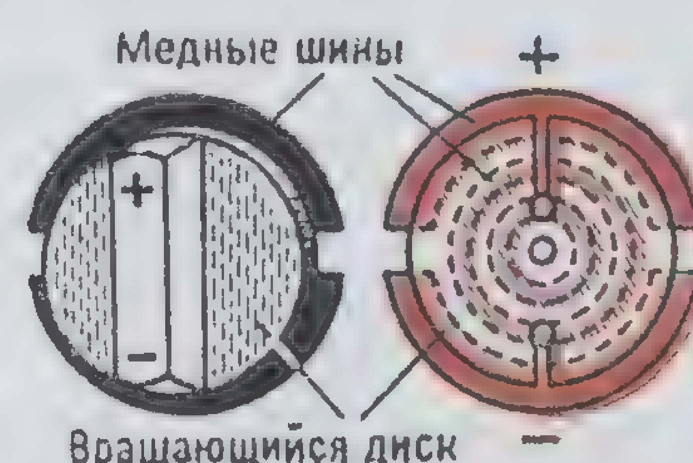
Отрицательный максимум тока в третьей фазе

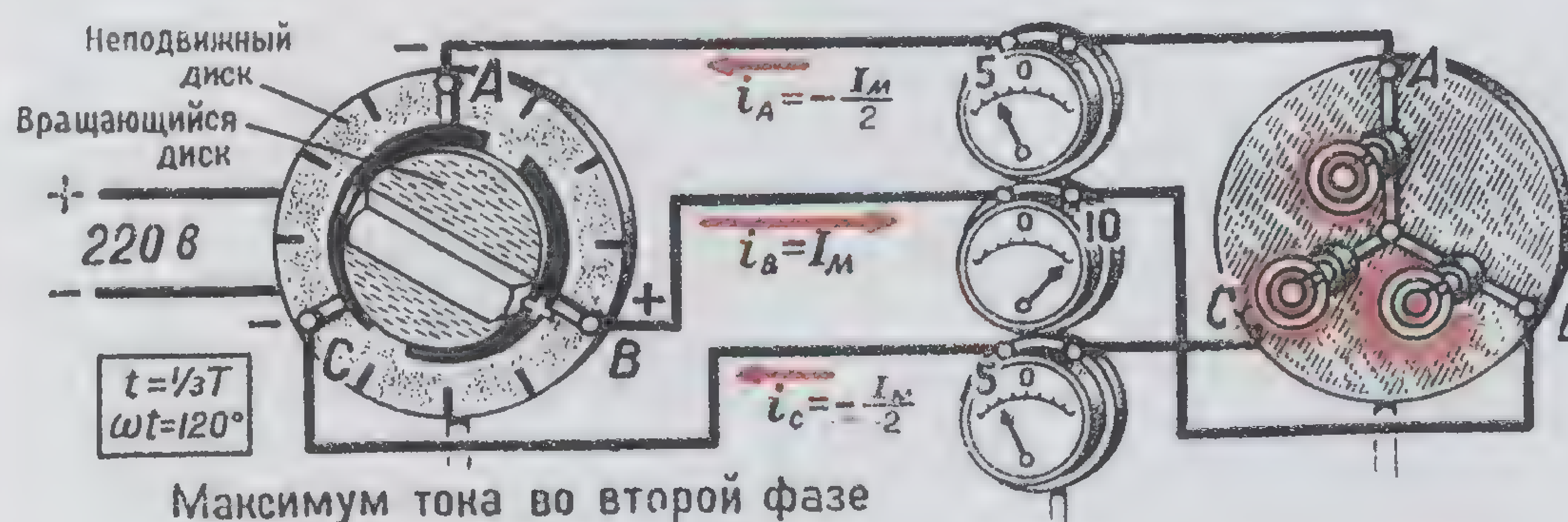


Векторные диаграммы

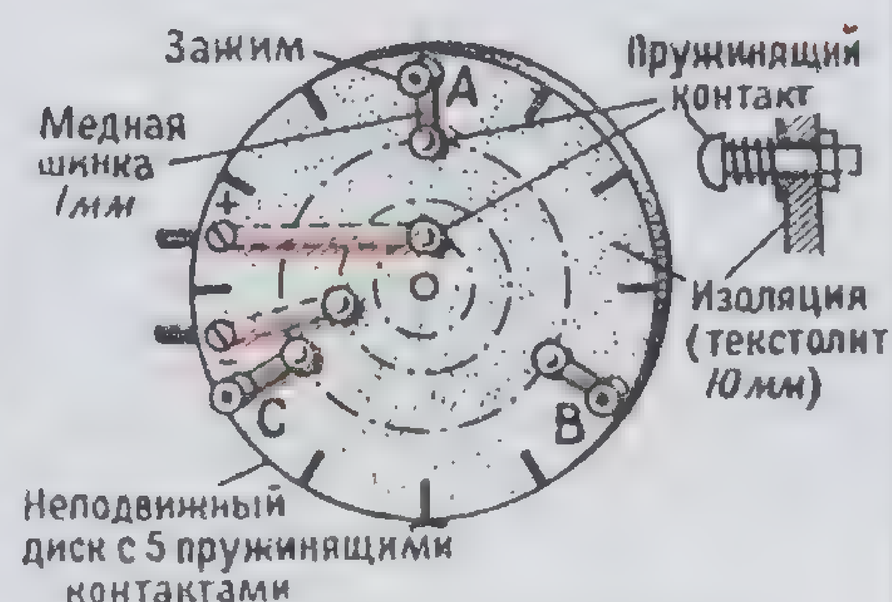


Отсутствие тока в первой фазе





Максимум тока во второй фазе



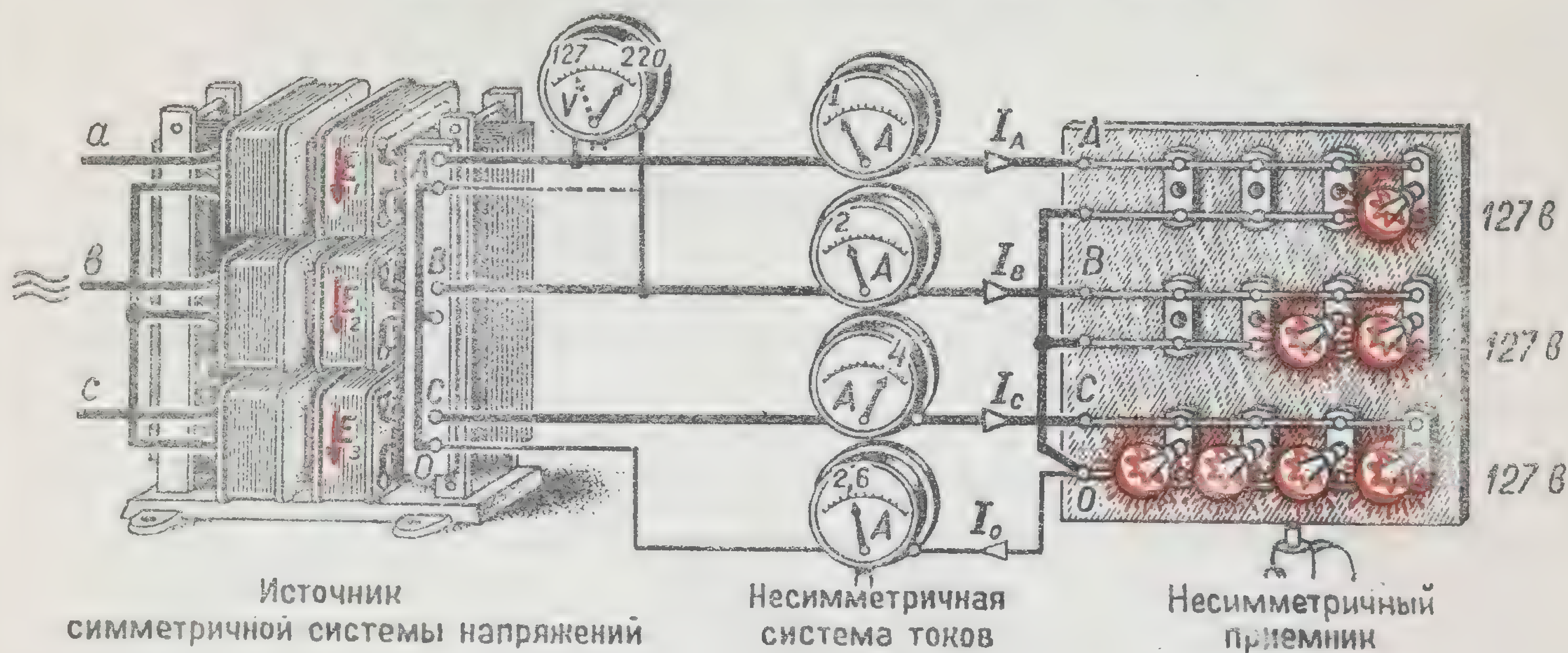
Устройство переключателя

Мгновенные значения токов в отдельных фазах через интервалы в 1/12 периода (30°)

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

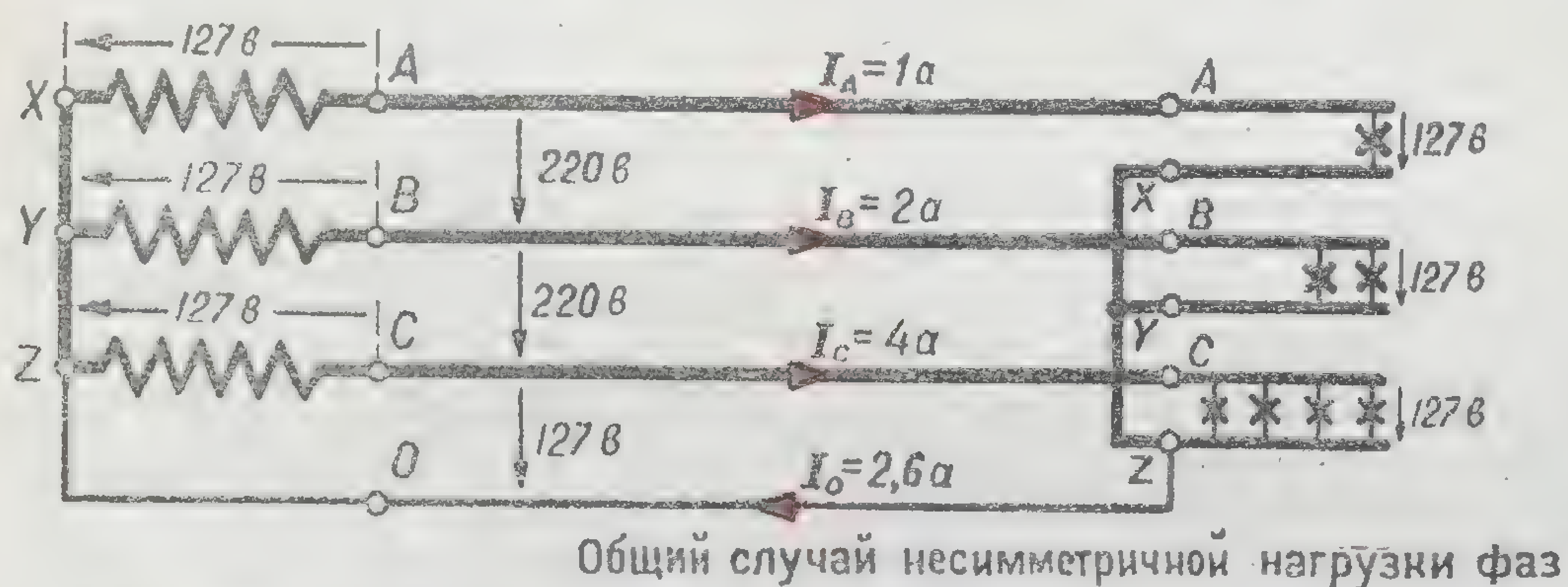
НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕЗДОЙ
(ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ СИСТЕМА)

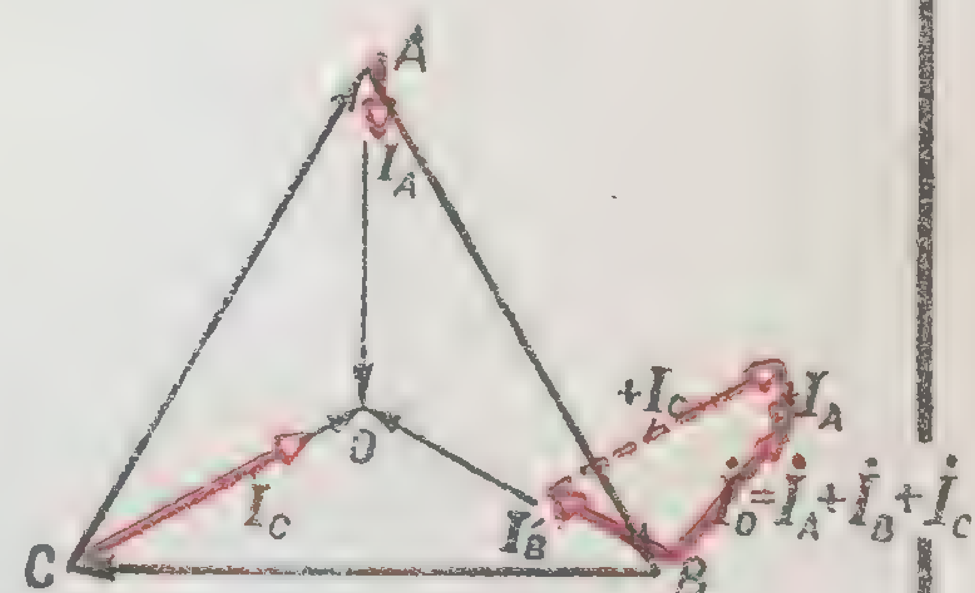


Источник симметричной системы напряжений

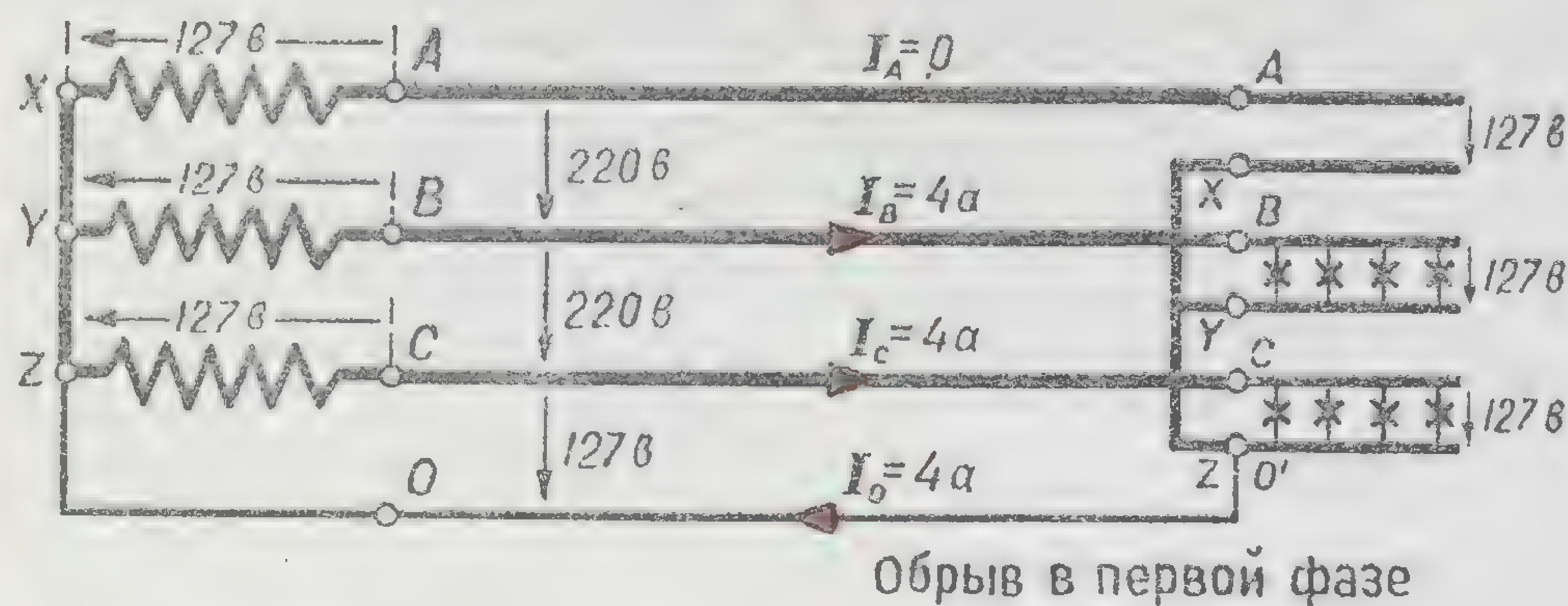
Несимметричная система токов

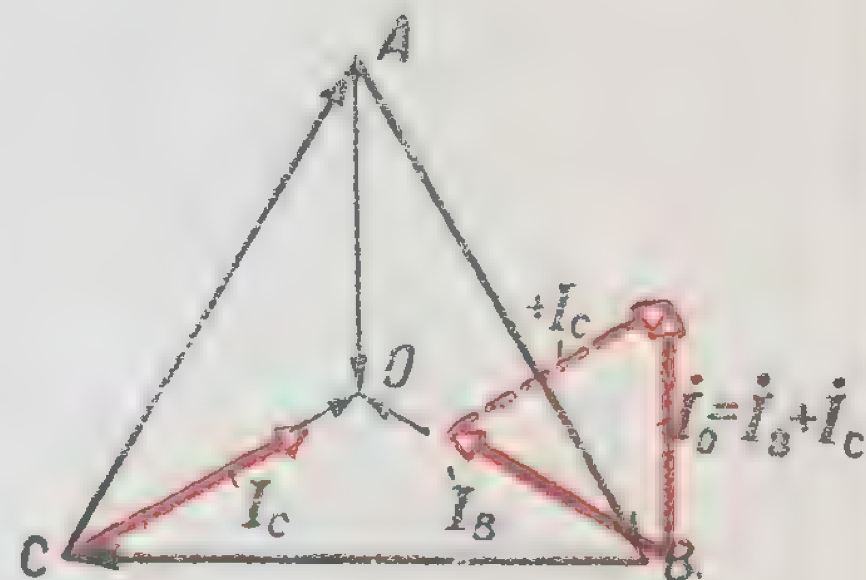
Несимметричный приемник



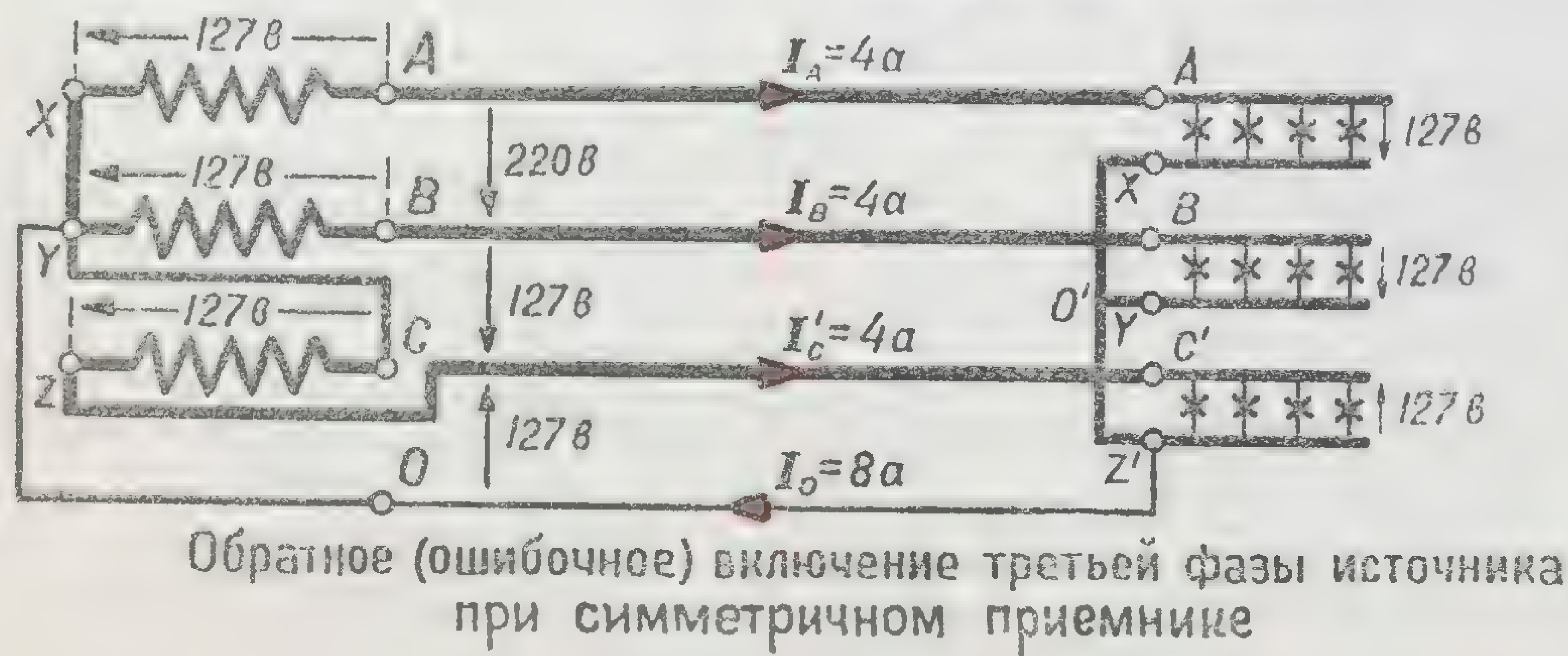


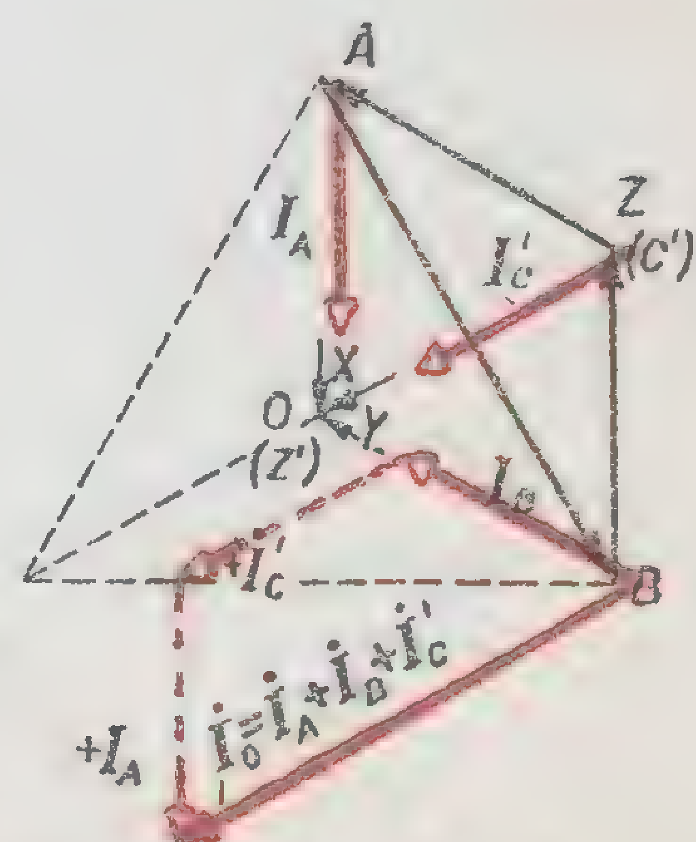
Общий случай несимметричной нагрузки фаз





Обрыв в первой фазе





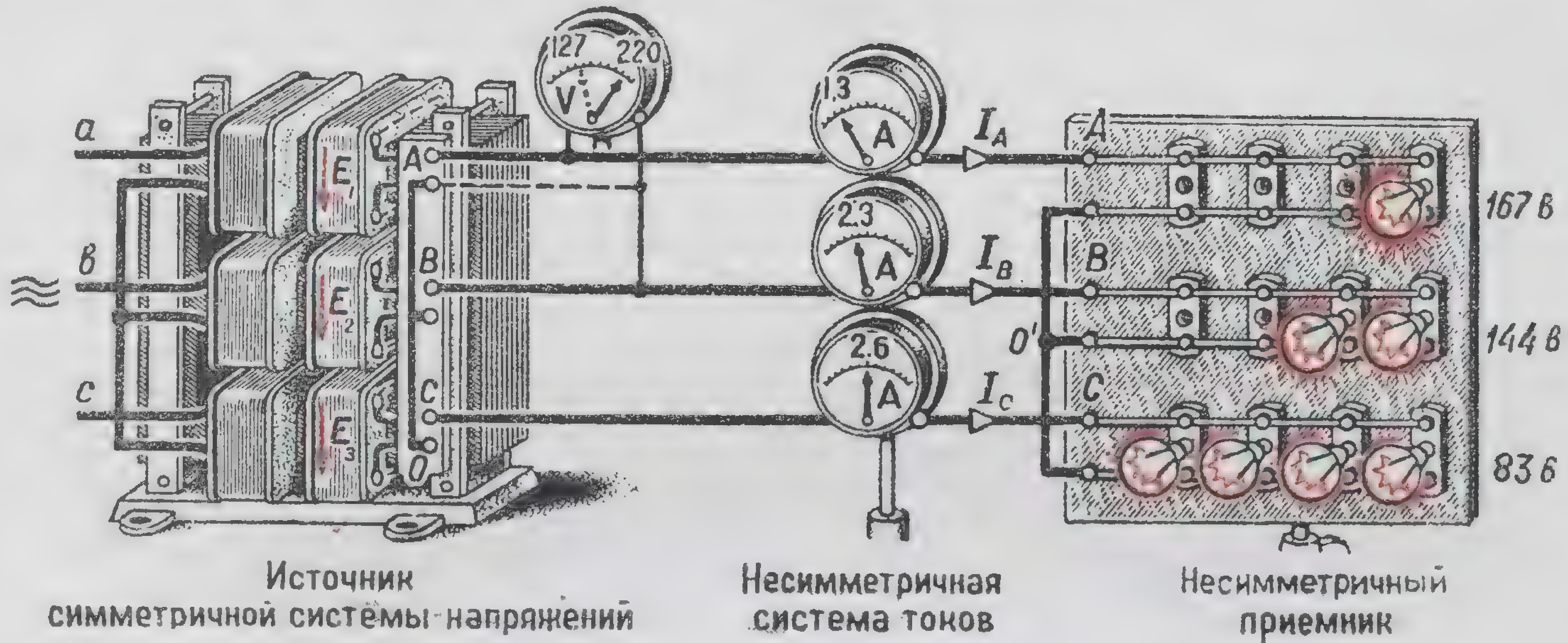
Обратное (ошибочное) включение третьей фазы источника при симметричном приемнике

При соединении осветительной нагрузки звездой обязательно применение нулевого провода

Э.И Расовский.

Худ А. Меньшиков

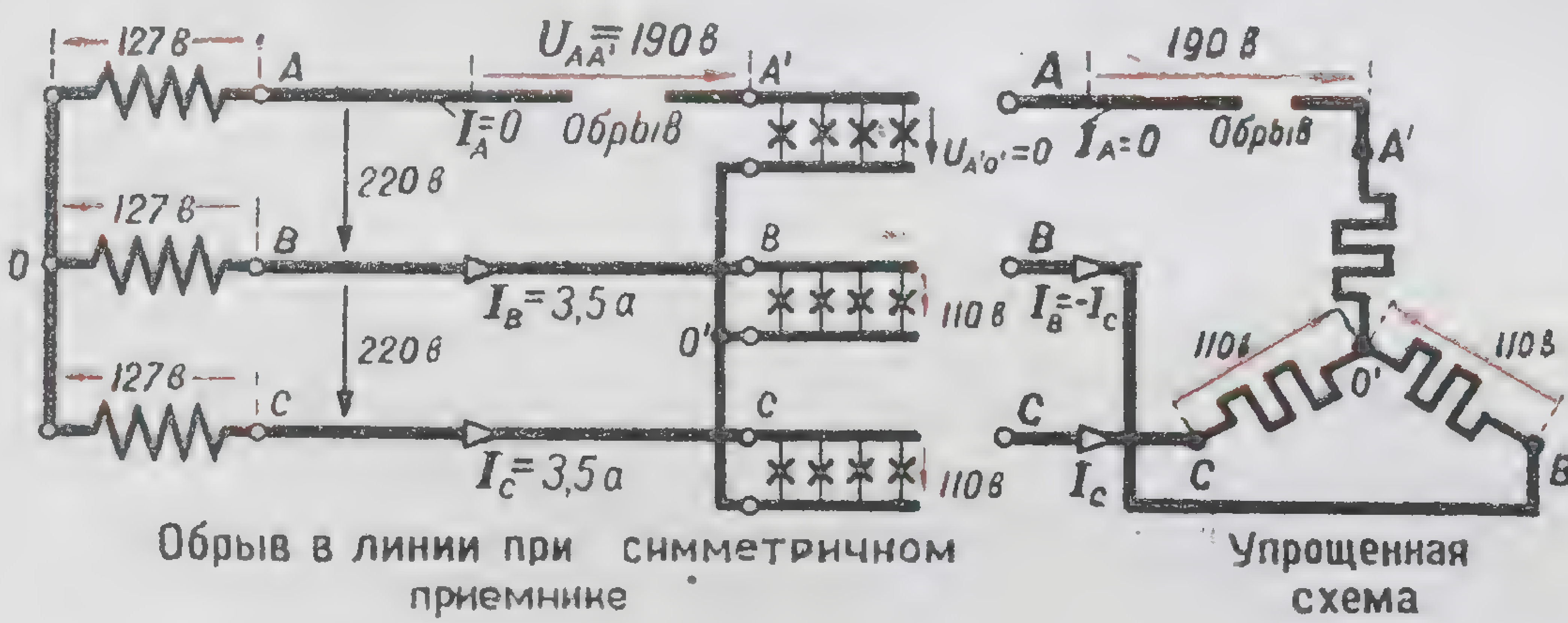
НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕЗДОЙ (ТРЕХПРОВОДНАЯ СИСТЕМА)



Источник симметричной системы напряжений

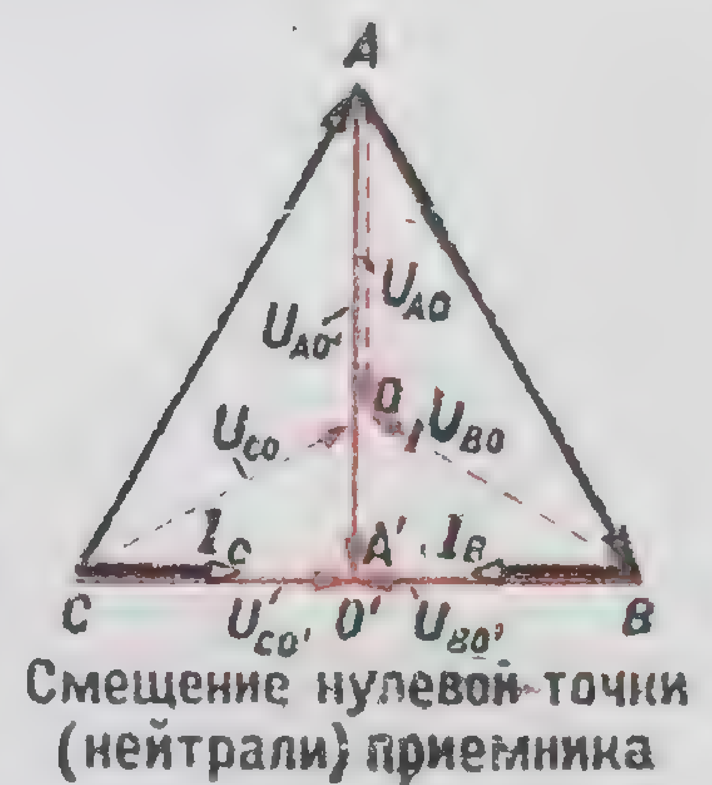
Несимметричная система токов

Несимметричный приемник

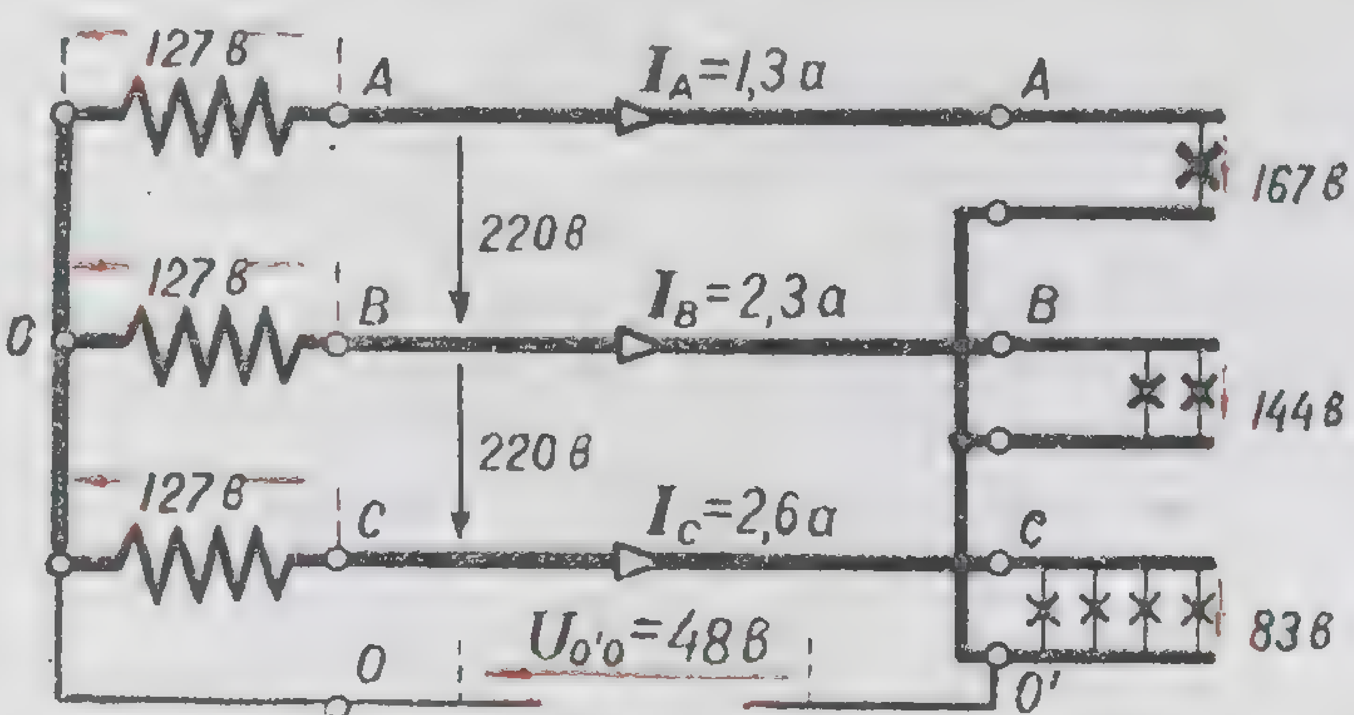


Обрыв в линии при симметричном приемнике

Упрощенная схема



Смещение нулевой точки (нейтрали) приемника

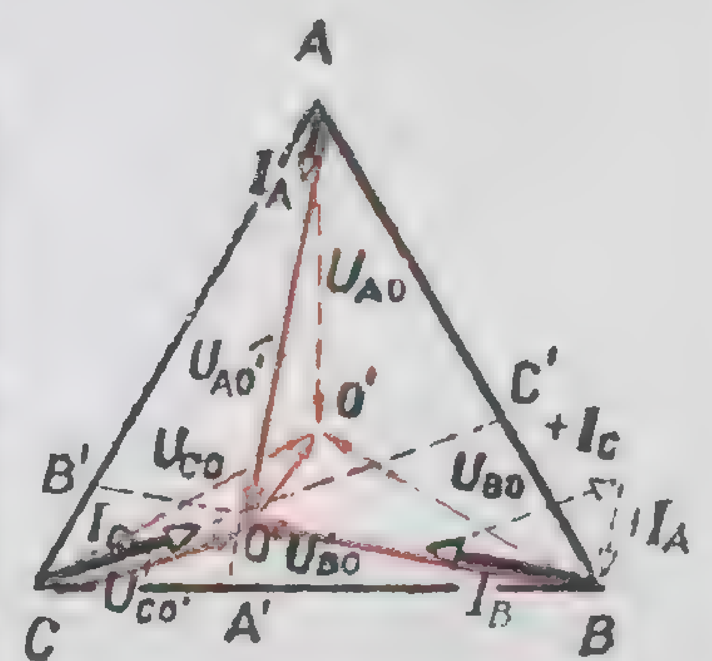


Обрыв нулевого провода при несимметричной однородной нагрузке

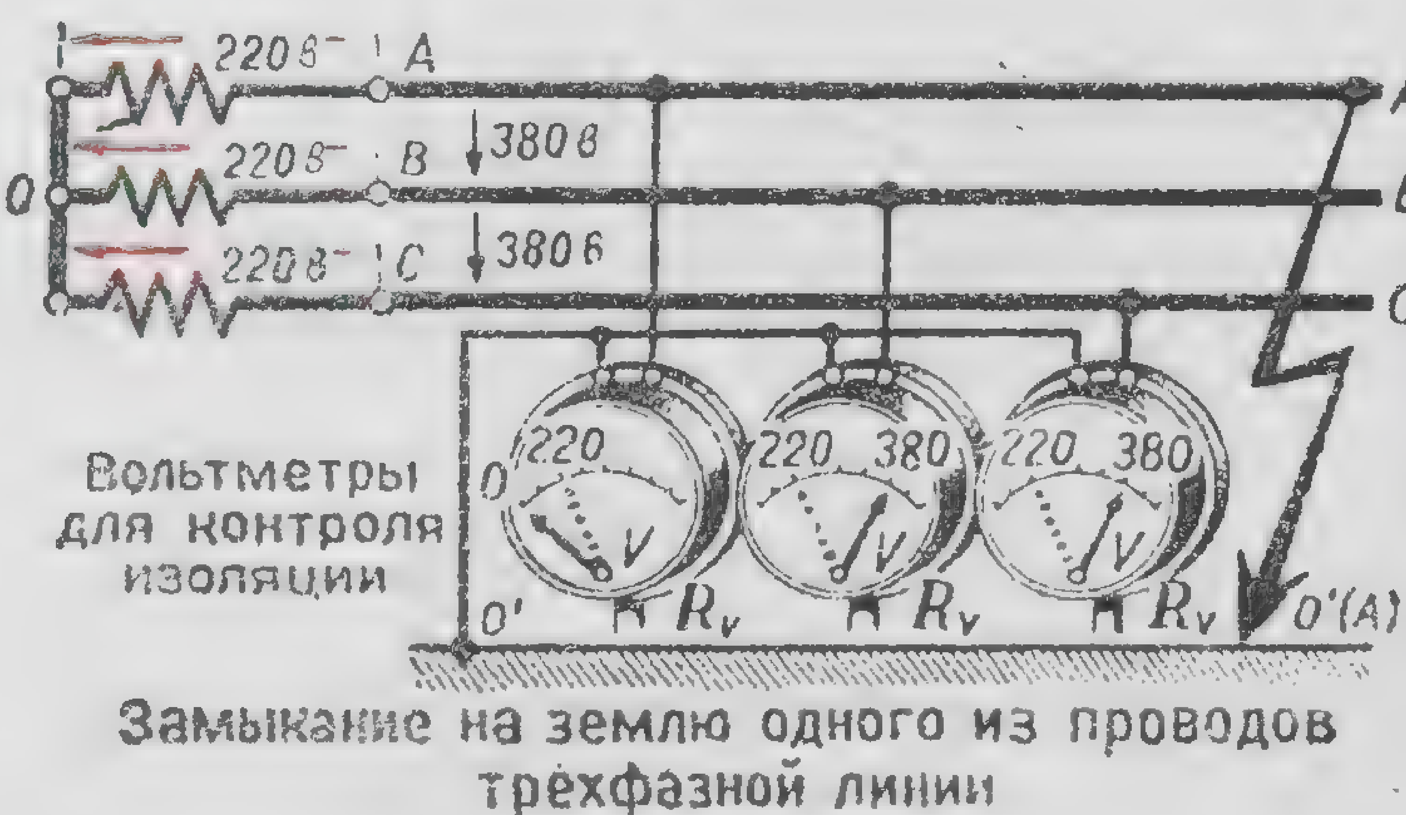
$$\frac{AC'}{C'B} = \frac{R_1}{R_2}; \quad \frac{BA'}{A'C} = \frac{R_2}{R_3}; \quad \frac{CB'}{B'A} = \frac{R_3}{R_1}$$

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

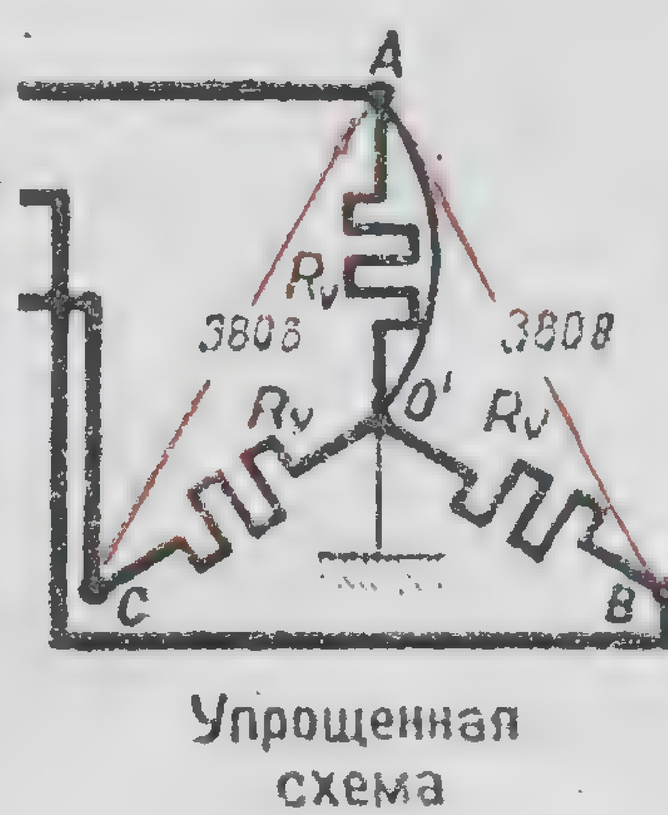
$$\frac{A0'}{0'A'} = \frac{R_1}{R_{23}}$$



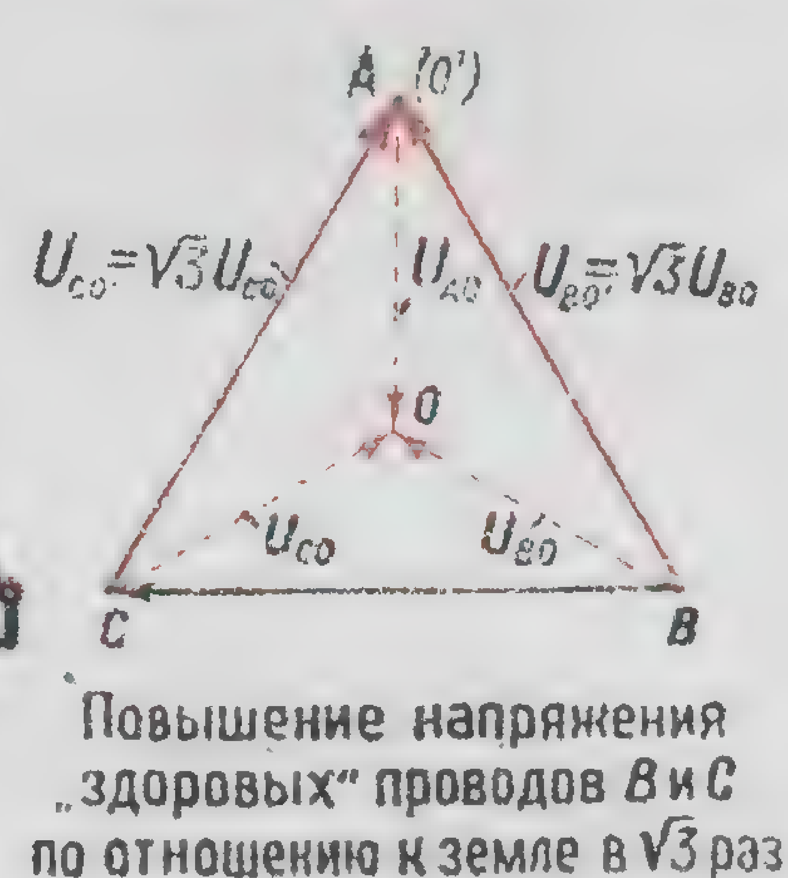
Смещение нулевой точки (нейтрали) приемника



Замыкание на землю одного из проводов трехфазной линии



Упрощенная схема



Повышение напряжения „здоровых" проводов В и С по отношению к земле в √3 раз

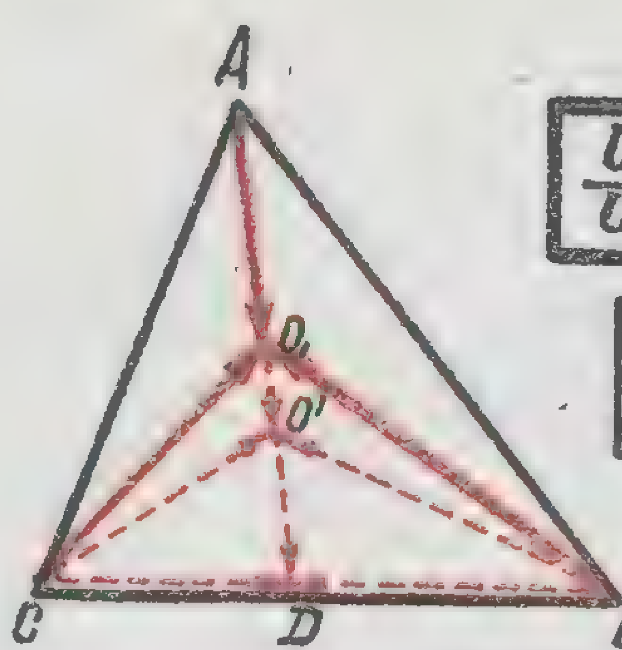
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРАЛИ



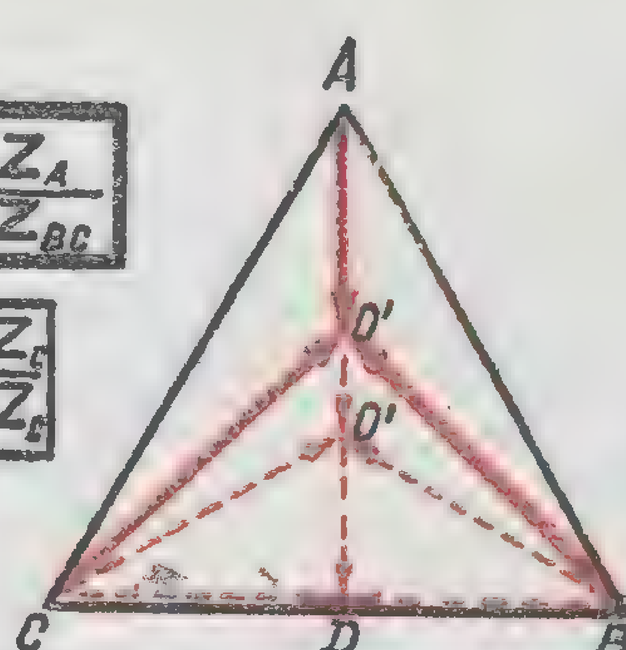
Активная нагрузка

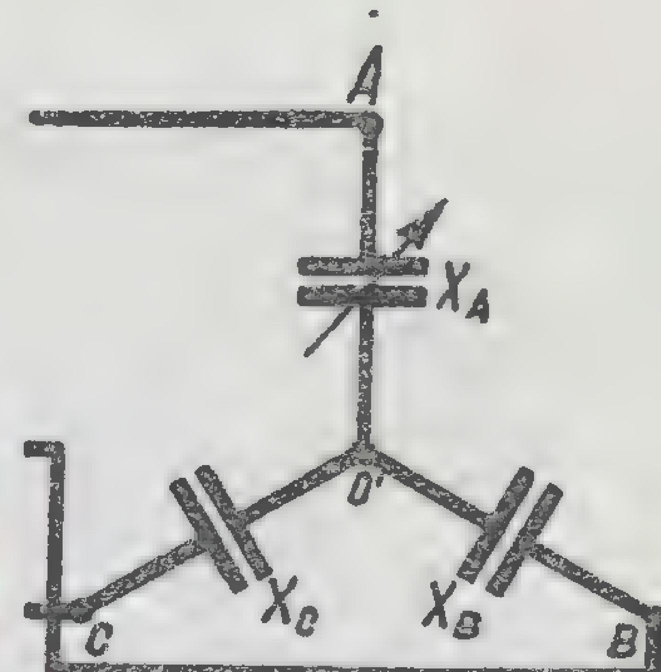


$$\frac{U_{AO'}}{U_{O'D}} = \frac{Z_A}{Z_{BC}}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_B Z_C}{Z_B + Z_C}$$

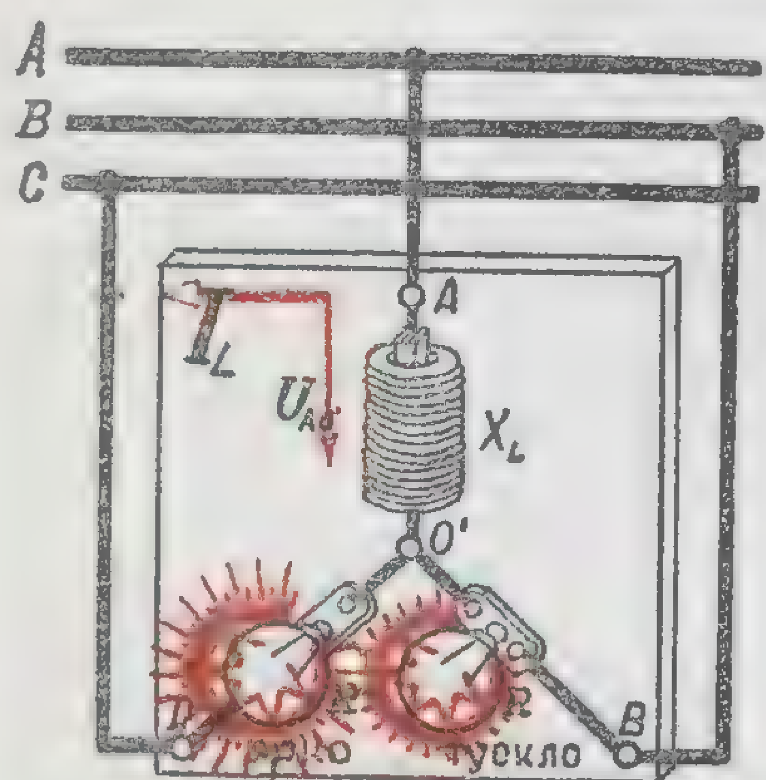
$$BD/DC = Z_B/Z_C$$



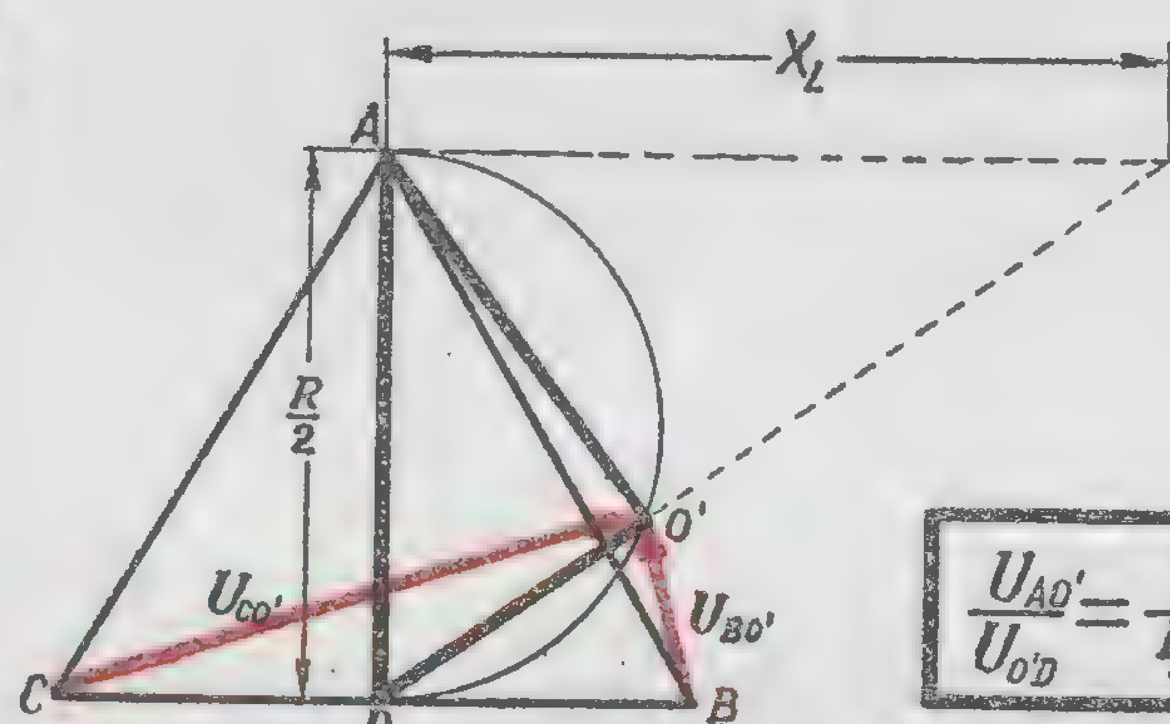


Емкостная нагрузка

Смещение нейтрали однородного приемника при изменении сопротивления одной из его фаз

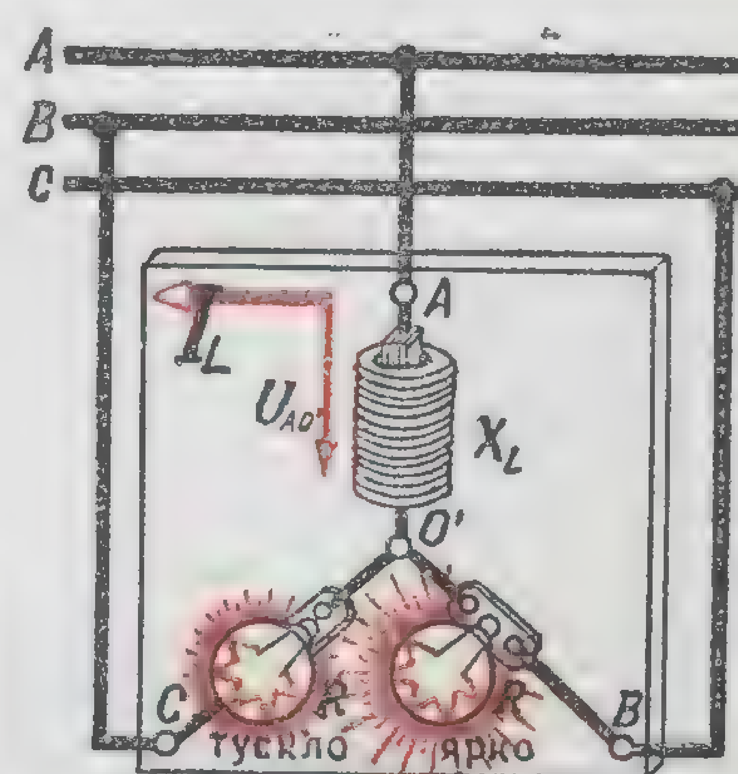


Совпадение последовательности фаз сети и фазоуказателя



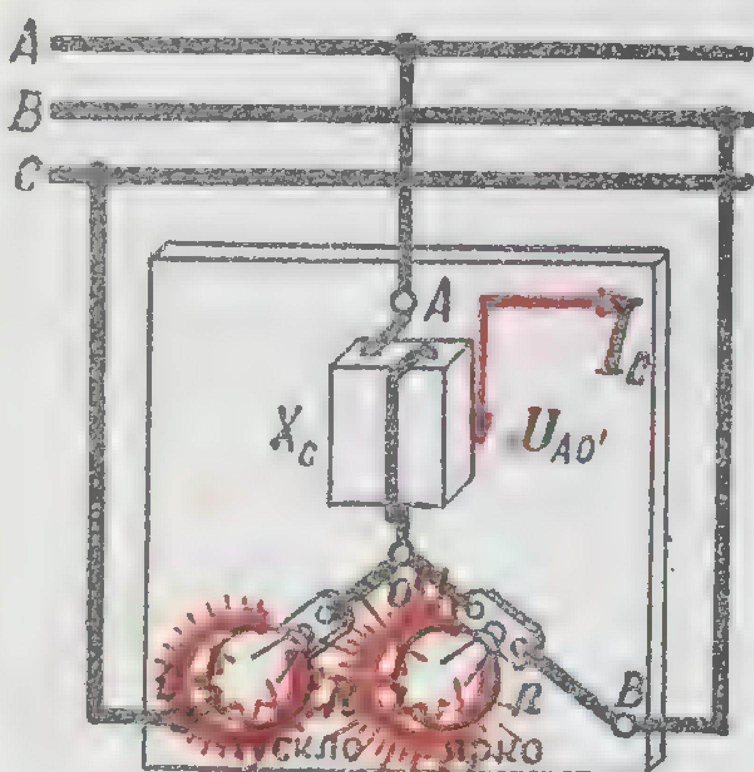
Графический метод определения положения нейтрали

$$\frac{U_{AO'}}{U_{O'D}} = \frac{X_L}{R/2}$$



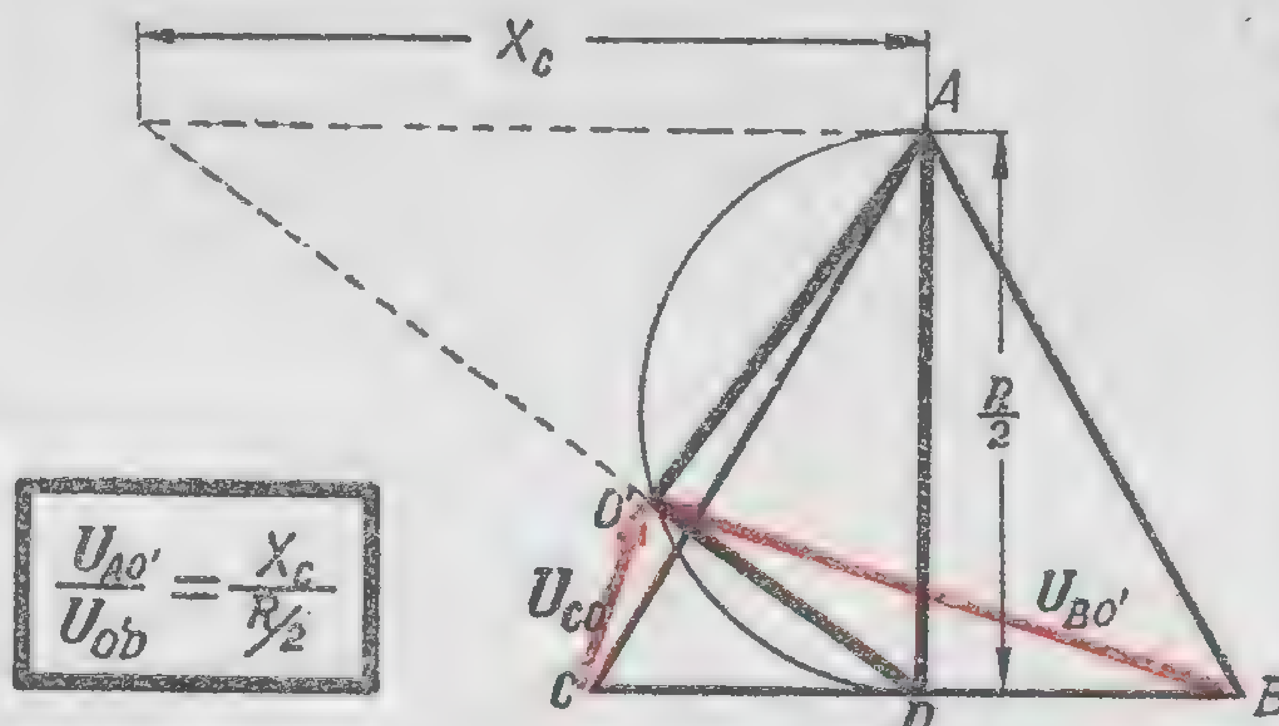
Несовпадение последовательности фаз сети и фазоуказателя

Фазоуказатель с индуктивной катушкой в фазе А

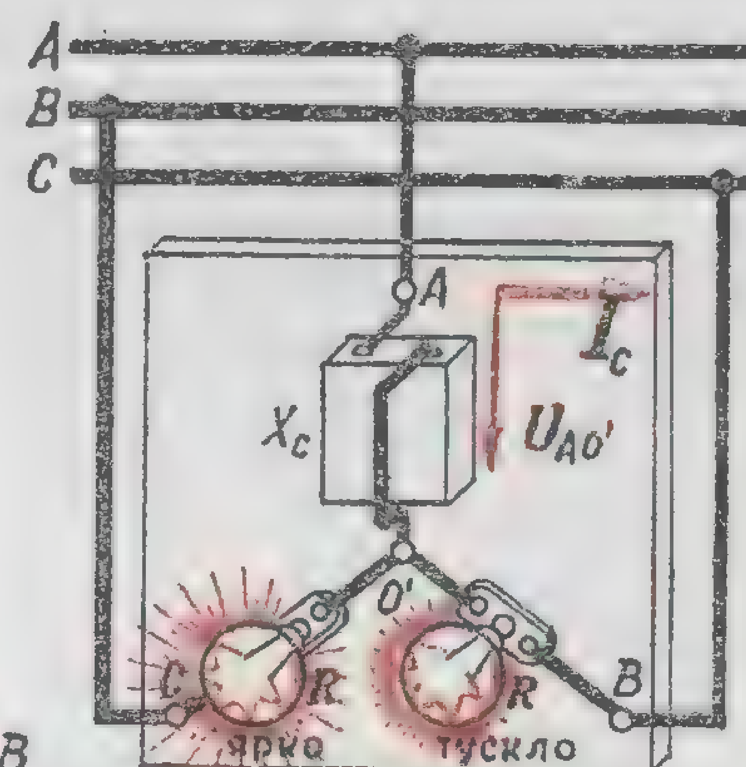


Совпадение последовательности фаз сети и фазоуказателя

$$\frac{U_{AO'}}{U_{O'D}} = \frac{X_C}{R/2}$$



Графический метод определения положения нейтрали



Несовпадение последовательности фаз сети и фазоуказателя

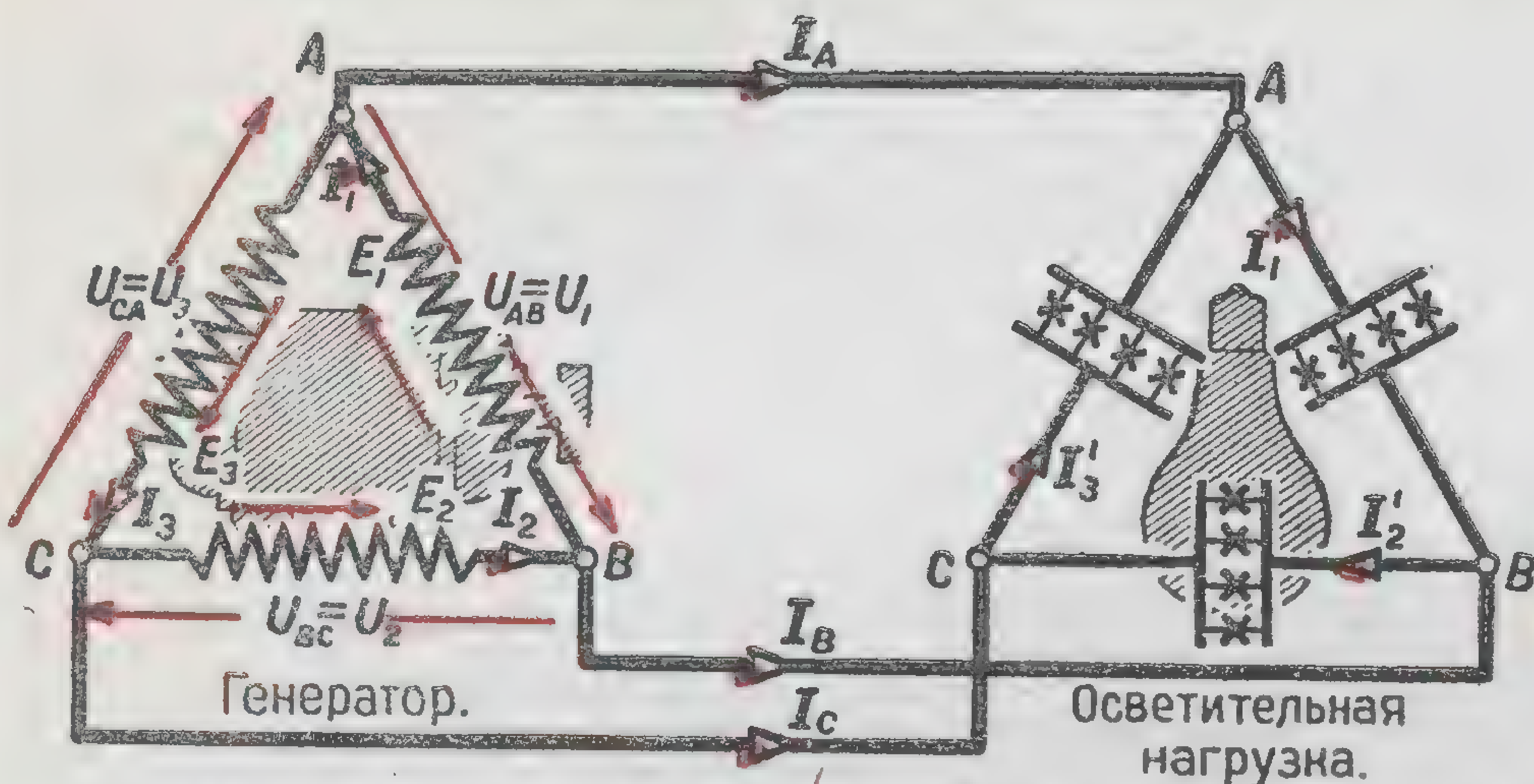
Фазоуказатель с конденсатором в фазе А

При совпадении последовательности фаз сети и фазоуказателя **ярче** горит лампа, расположенная **под вектором тока фазы А** (I_L или I_c)

Специальная звезда-указатель последовательности фаз

Э.И. Ресовский

СОЕДИНЕНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ (Δ)



Соединение источника и приемника треугольником



Векторная диаграмма для равномерной активной нагрузки ($\varphi = 0$).

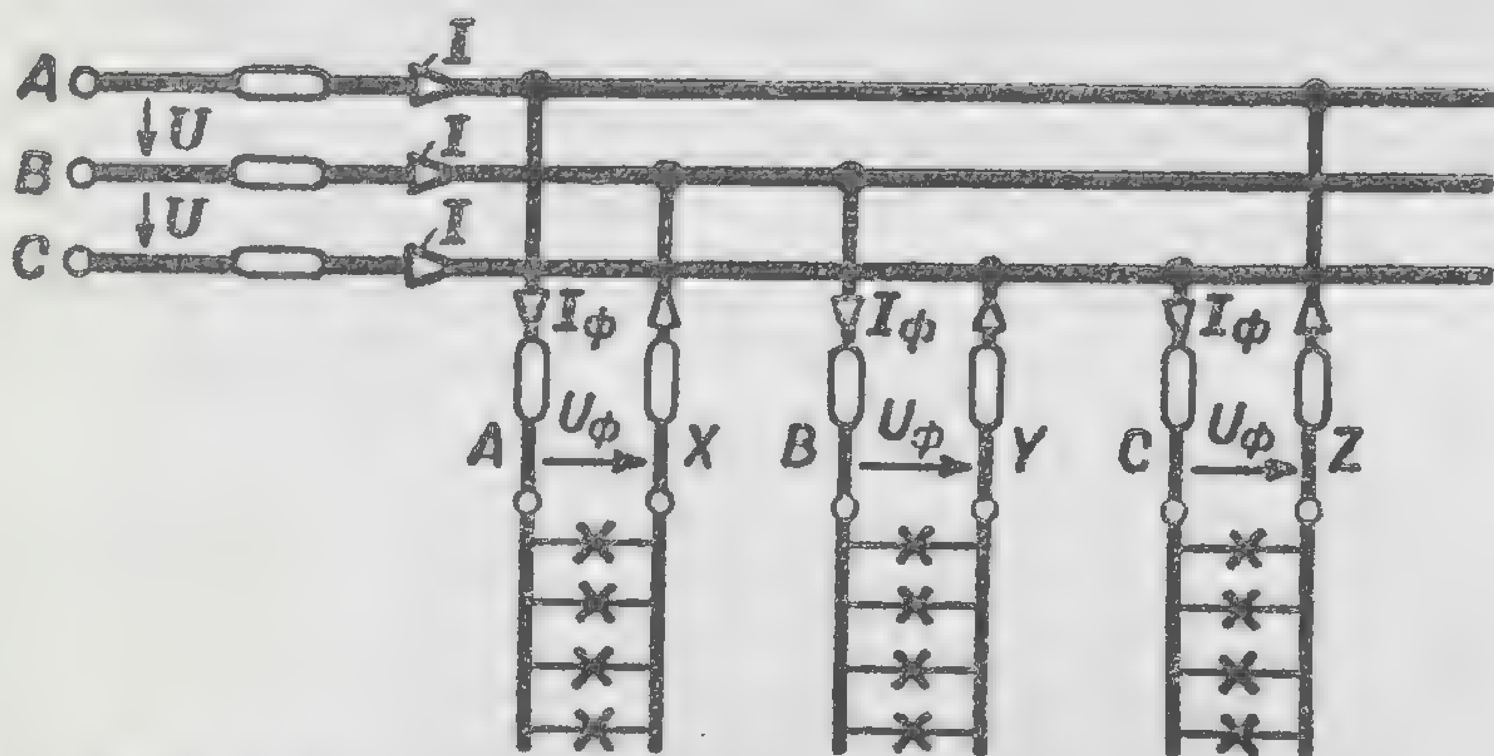


Схема соединения осветительной нагрузки.

$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_1$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_2$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_3$ $(U = U_\phi)$ в

$\dot{I}_A = \dot{I}_1 - \dot{I}_3$; $\dot{I}_B = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$; $\dot{I}_C = \dot{I}_3 - \dot{I}_2$ а

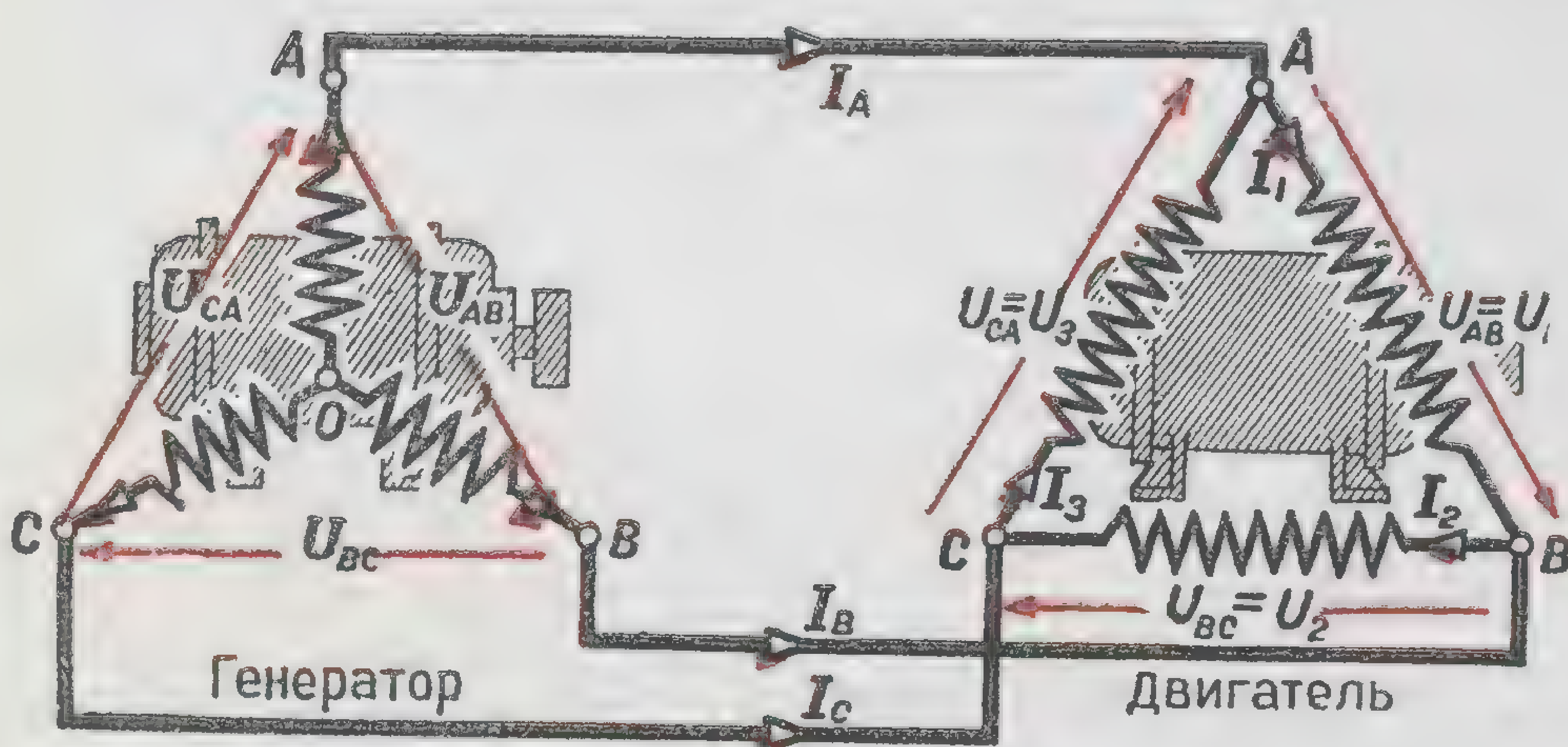
Соотношения между линейными и фазовыми напряжениями и токами.

При соединении треугольником линейное напряжение (U) является фазовым (U_ϕ), а линейный ток (I) равен геометрической разности двух смежных фазовых токов (I_ϕ).

$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ в

В трехпроводной системе сумма линейных токов, как и сумма линейных напряжений, равна нулю.

$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ а



Соединение источника звездой, а приемника треугольником.



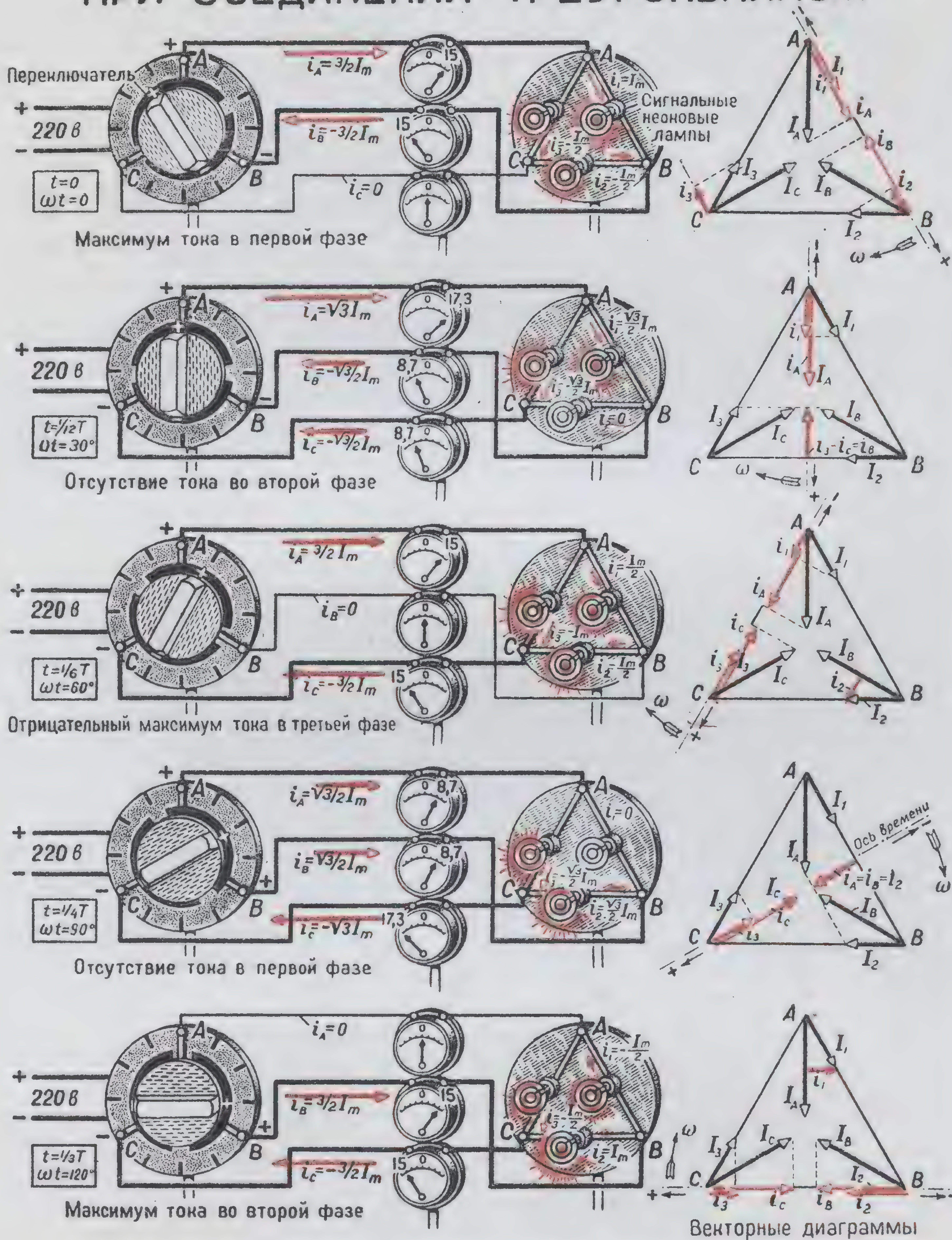
Векторная диаграмма для равномерной индуктивной нагрузки ($90° > \varphi > 0$).

$I = \sqrt{3} I_\phi$ а

В симметричной системе, соединенной треугольником линейный ток больше фазового в $\sqrt{3}$ раз и отстает от него по фазе на 30°

Э. И. Расовский

МГНОВЕННОЕ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

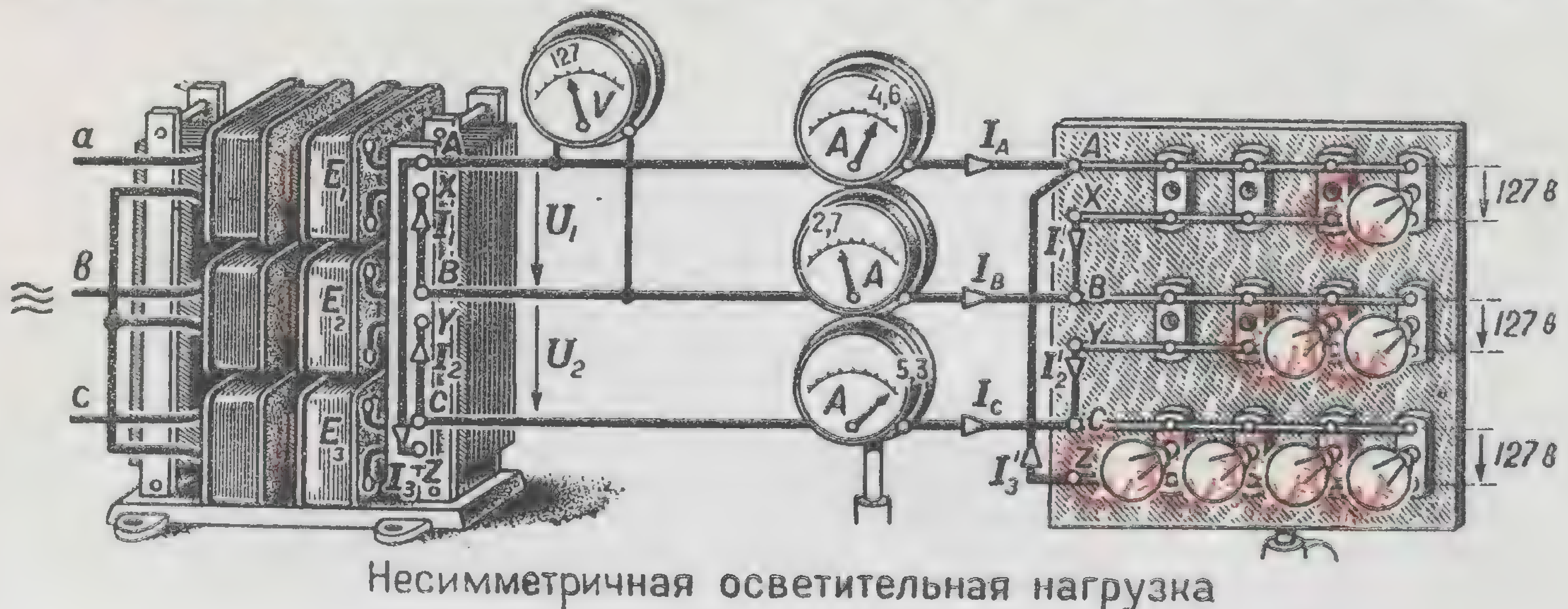


Мгновенные значения фазовых и линейных токов через интервалы в 1/12 периода (30°)

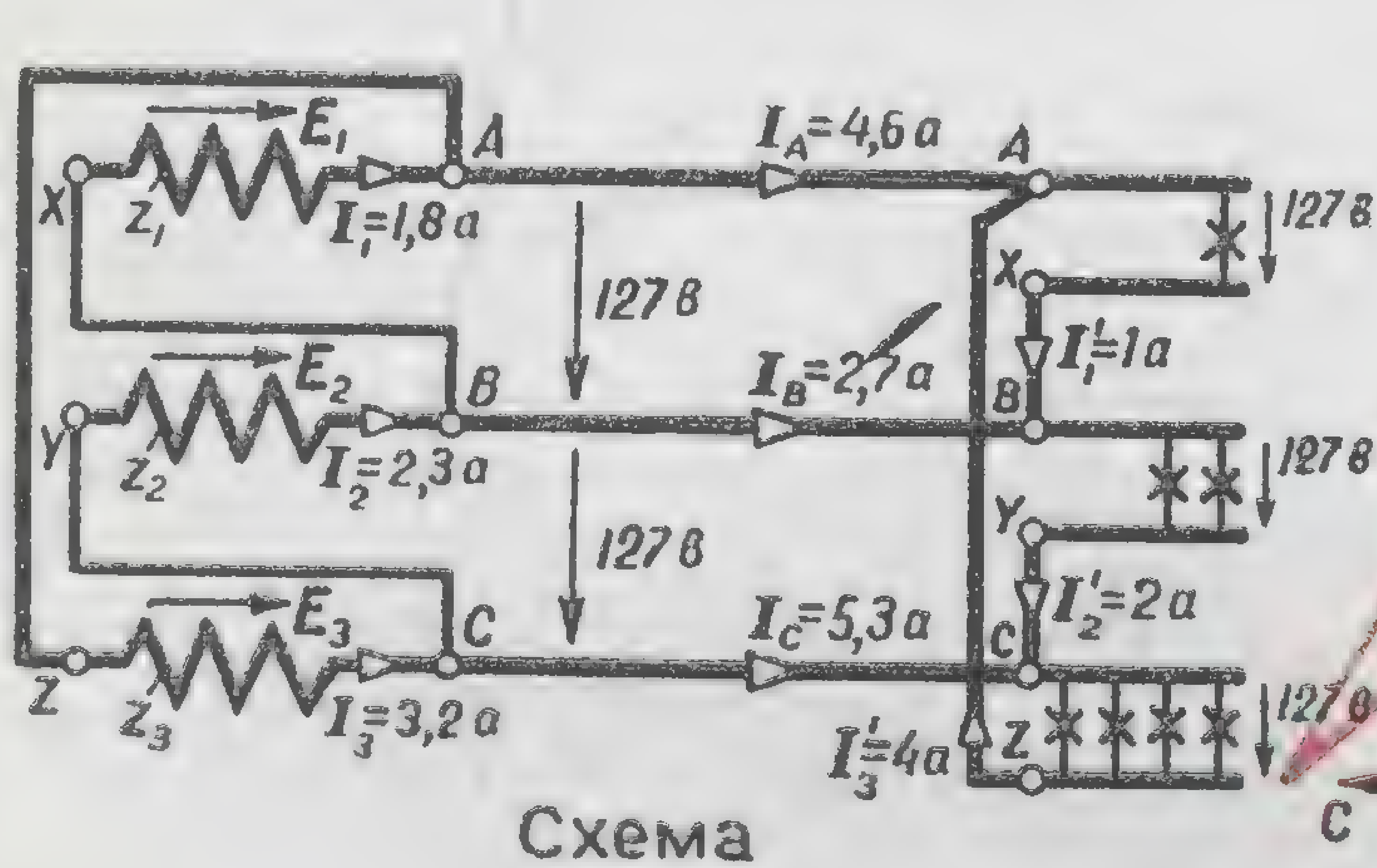
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

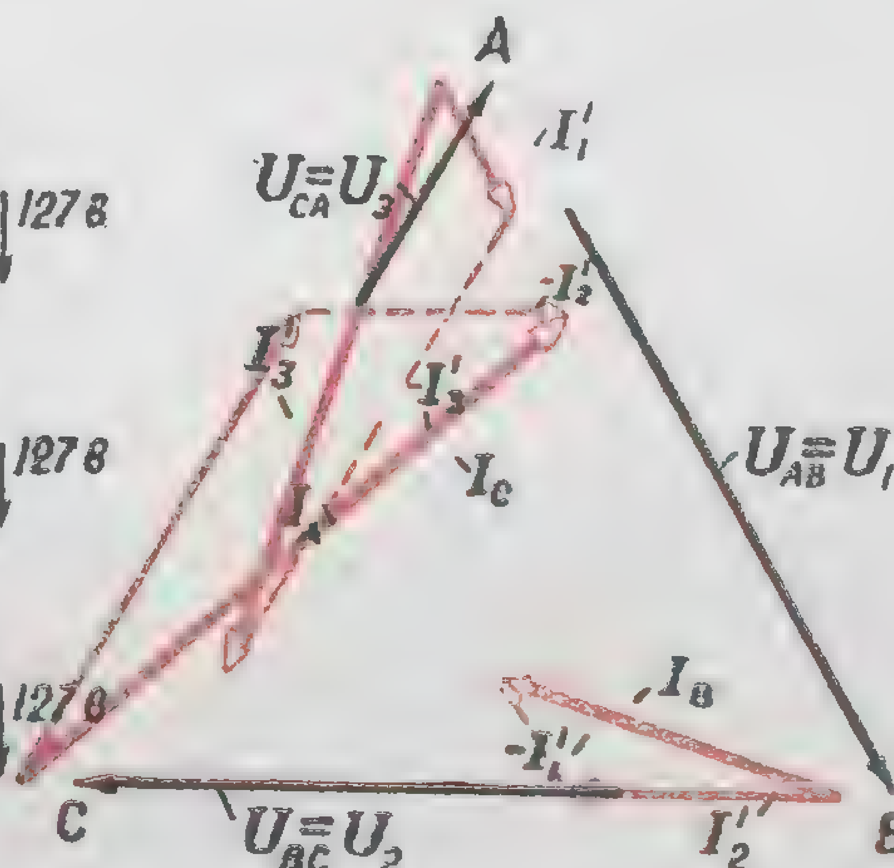
НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ



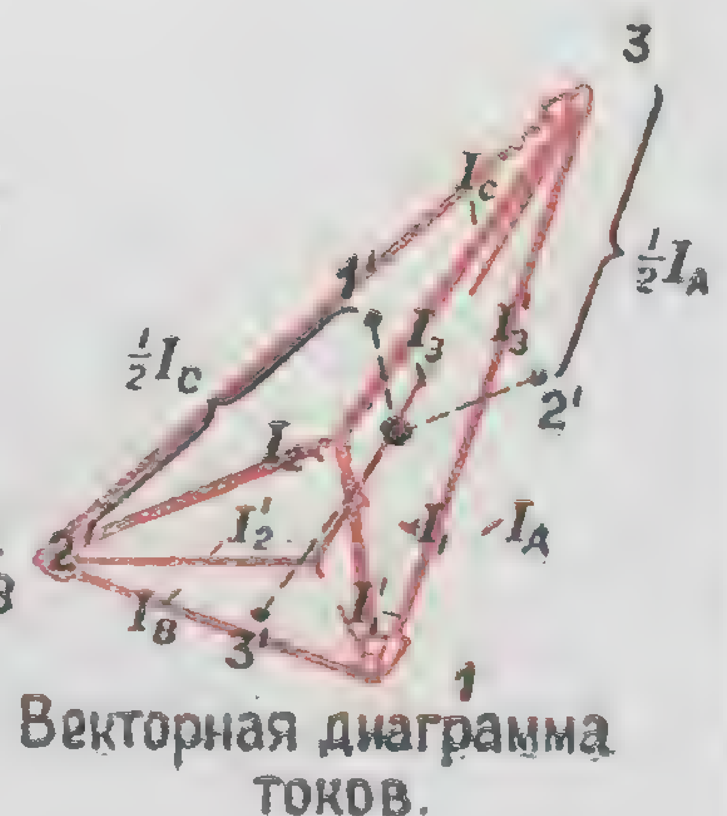
Несимметричная осветительная нагрузка



Схема



Векторная диаграмма напряжений и токов.



Векторная диаграмма токов.

$E_1=E_2=E_3$ в

$Z_1=Z_2=Z_3$ ом

Эдс и сопротивления симметричного трехфазного источника

$$\dot I_A=\dot I_1-\dot I_3=\dot I_1'-\dot I_3'$$
$$\dot I_B=\dot I_2-\dot I_1=\dot I_2'-\dot I_1'$$
$$\dot I_C=\dot I_3-\dot I_2=\dot I_3'-\dot I_2'$$
$$\dot I_A+\dot I_B+\dot I_C=0$$

а

Линейные токи

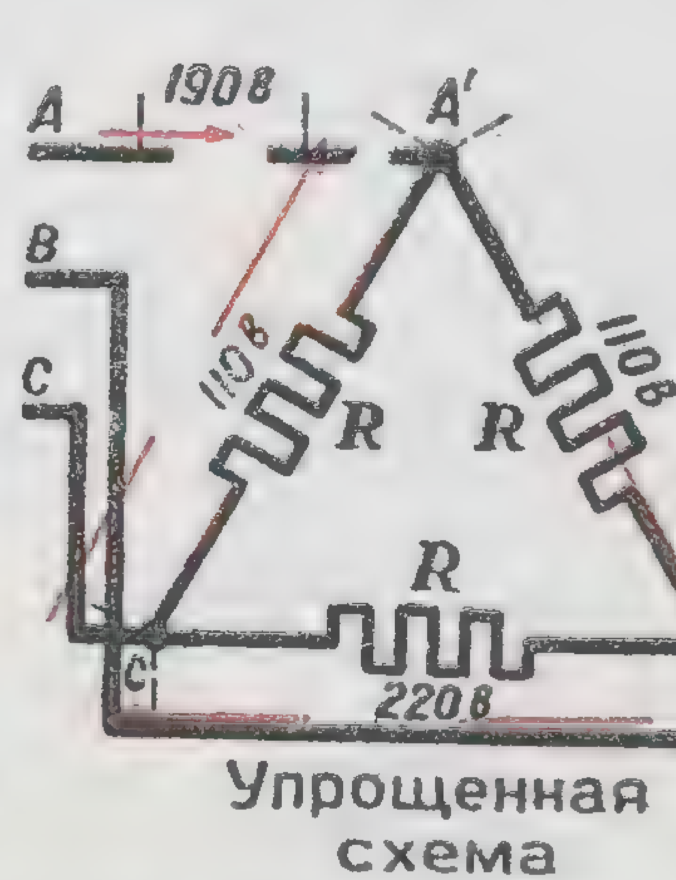
$$\dot I_1=\frac{1}{3}(\dot I_A-\dot I_B)$$
$$\dot I_2=\frac{1}{3}(\dot I_B-\dot I_C)$$
$$\dot I_3=\frac{1}{3}(\dot I_C-\dot I_A)$$
$$\dot I_1+\dot I_2+\dot I_3=0$$

а

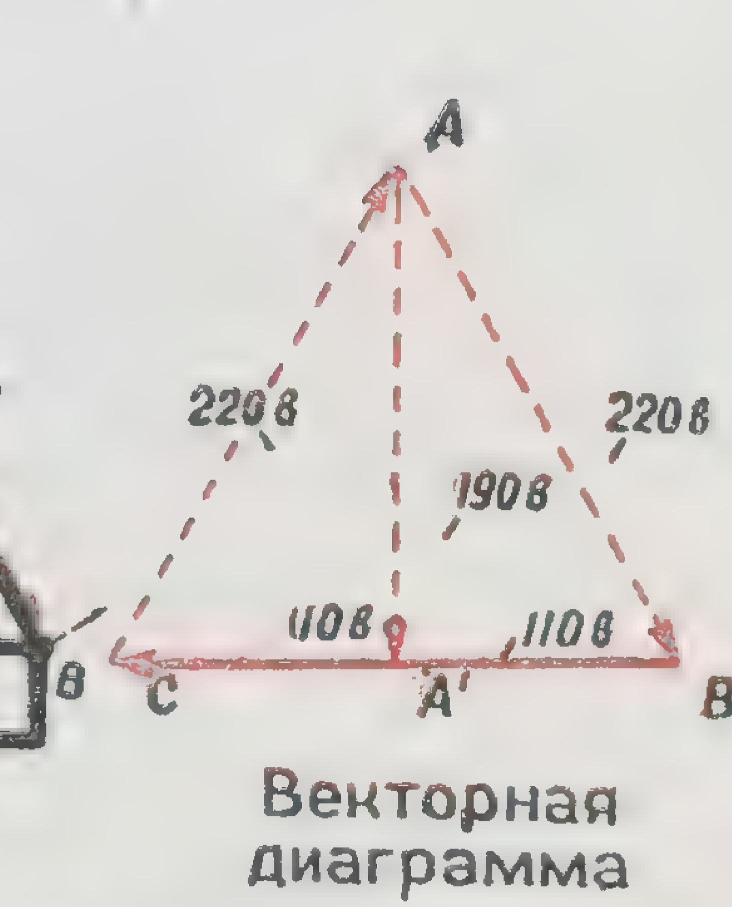
Фазовые токи симметричного источника

Начало векторов **фазовых** токов симметричного источника лежит в центре тяжести треугольника **линейных** токов





Упрощенная схема



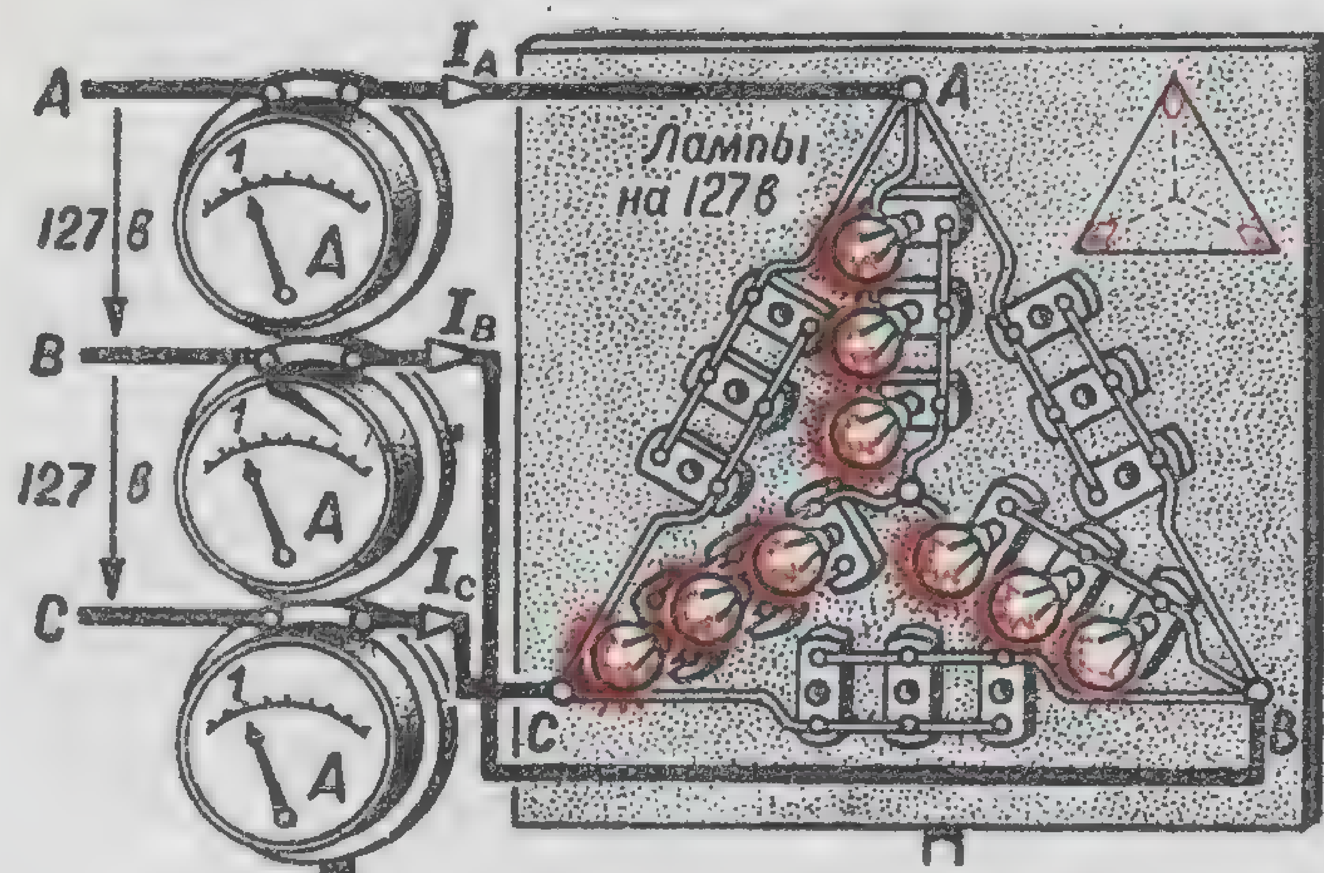
Векторная диаграмма

Частный случай несимметричной нагрузки: обрыв в линии

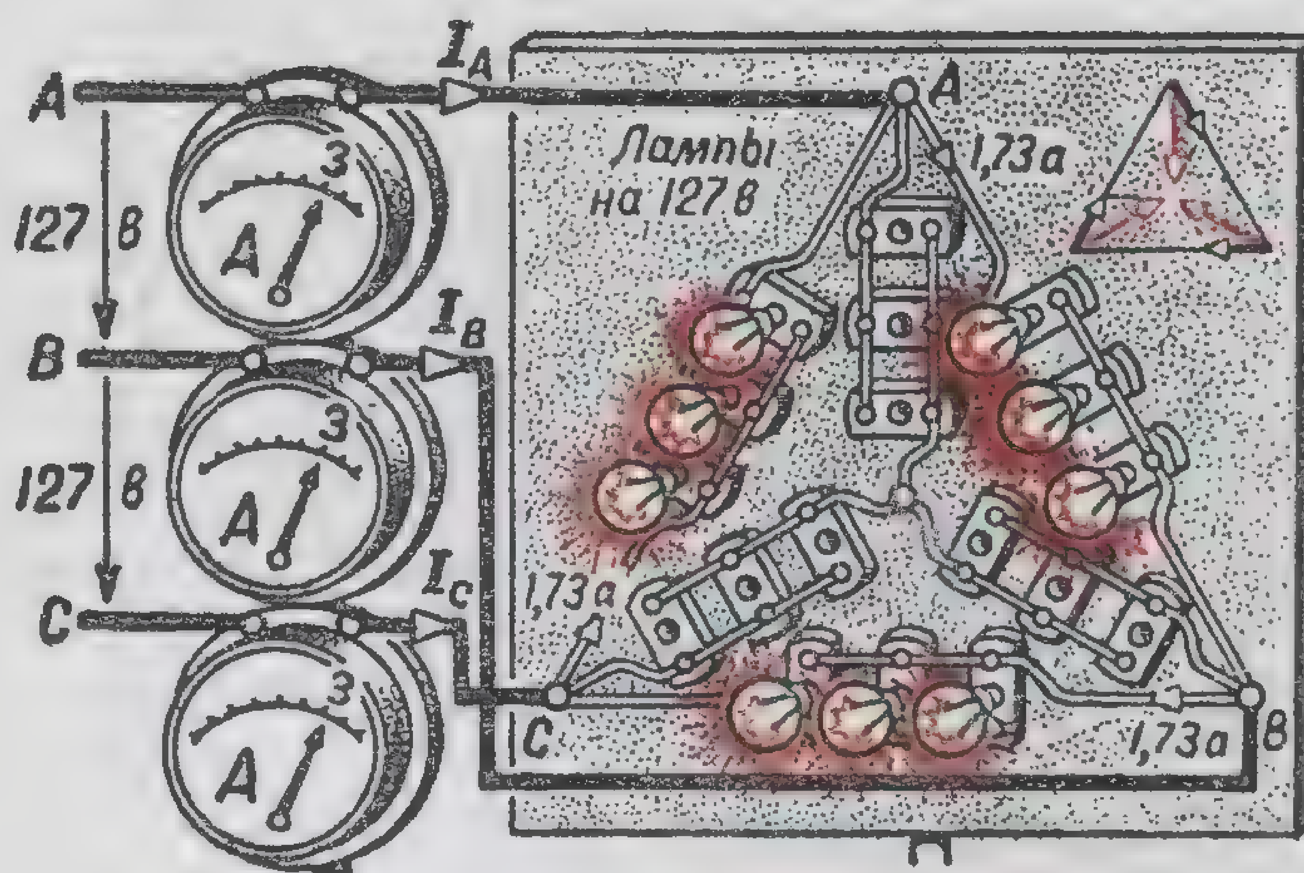
Э.И.Расовский

Худ. А. Меньшиков

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СО ЗВЕЗДЫ НА ТРЕУГОЛЬНИК

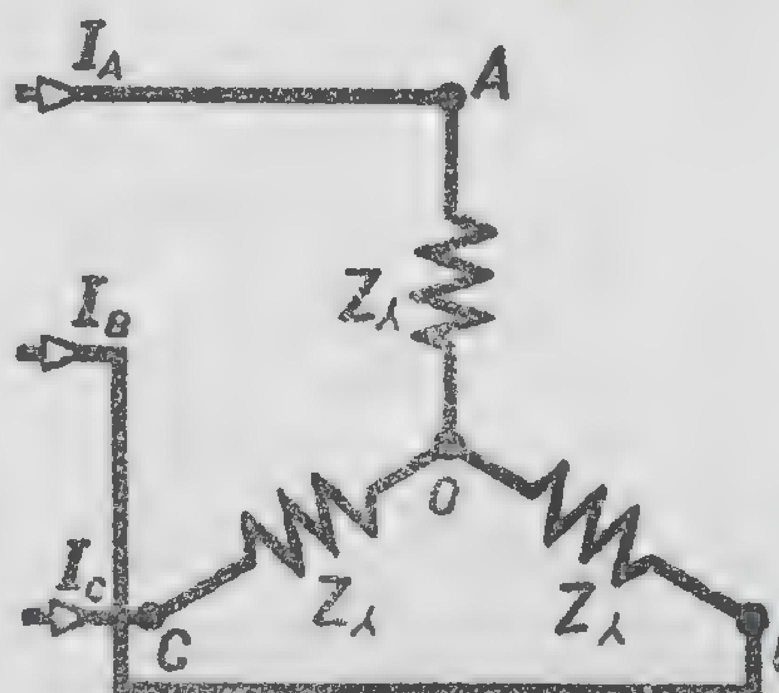


Соединение звездой

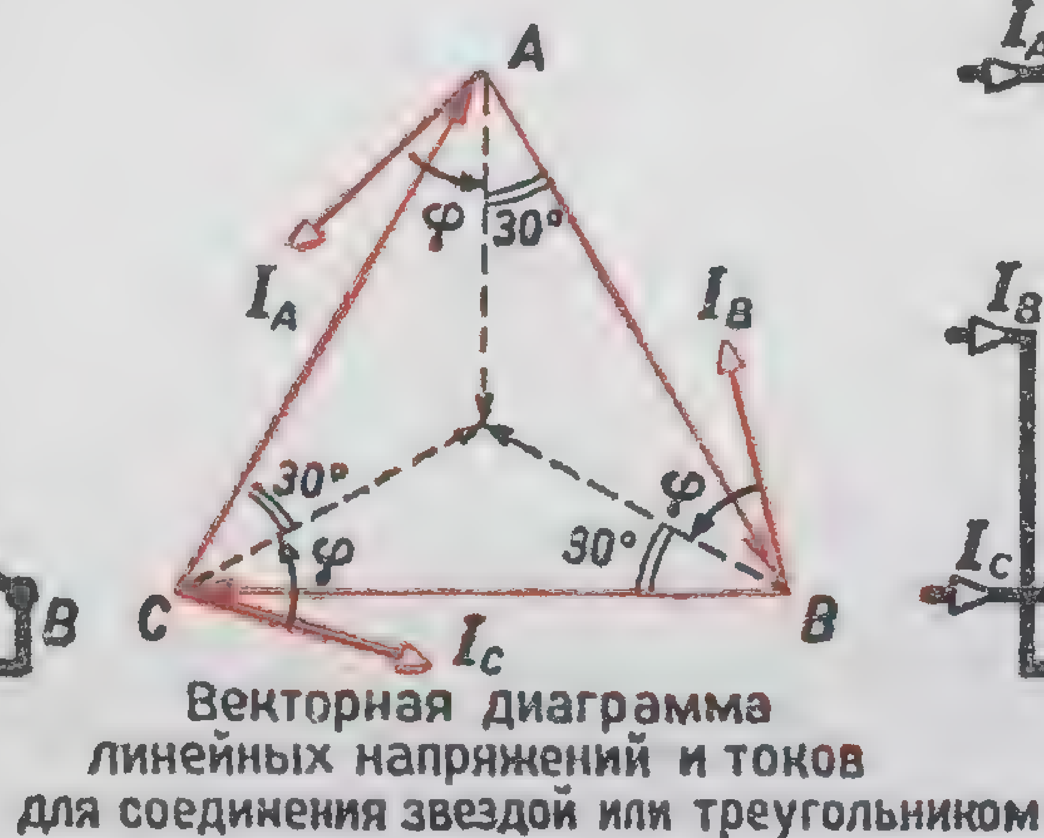


Соединение треугольником

При переключении трех одинаковых сопротивлений со звезды на треугольник фазовые токи возрастают в $\sqrt{3}$ раз, а линейные — в 3 раза



Соединение звездой



Векторная диаграмма линейных напряжений и токов для соединения звездой или треугольником

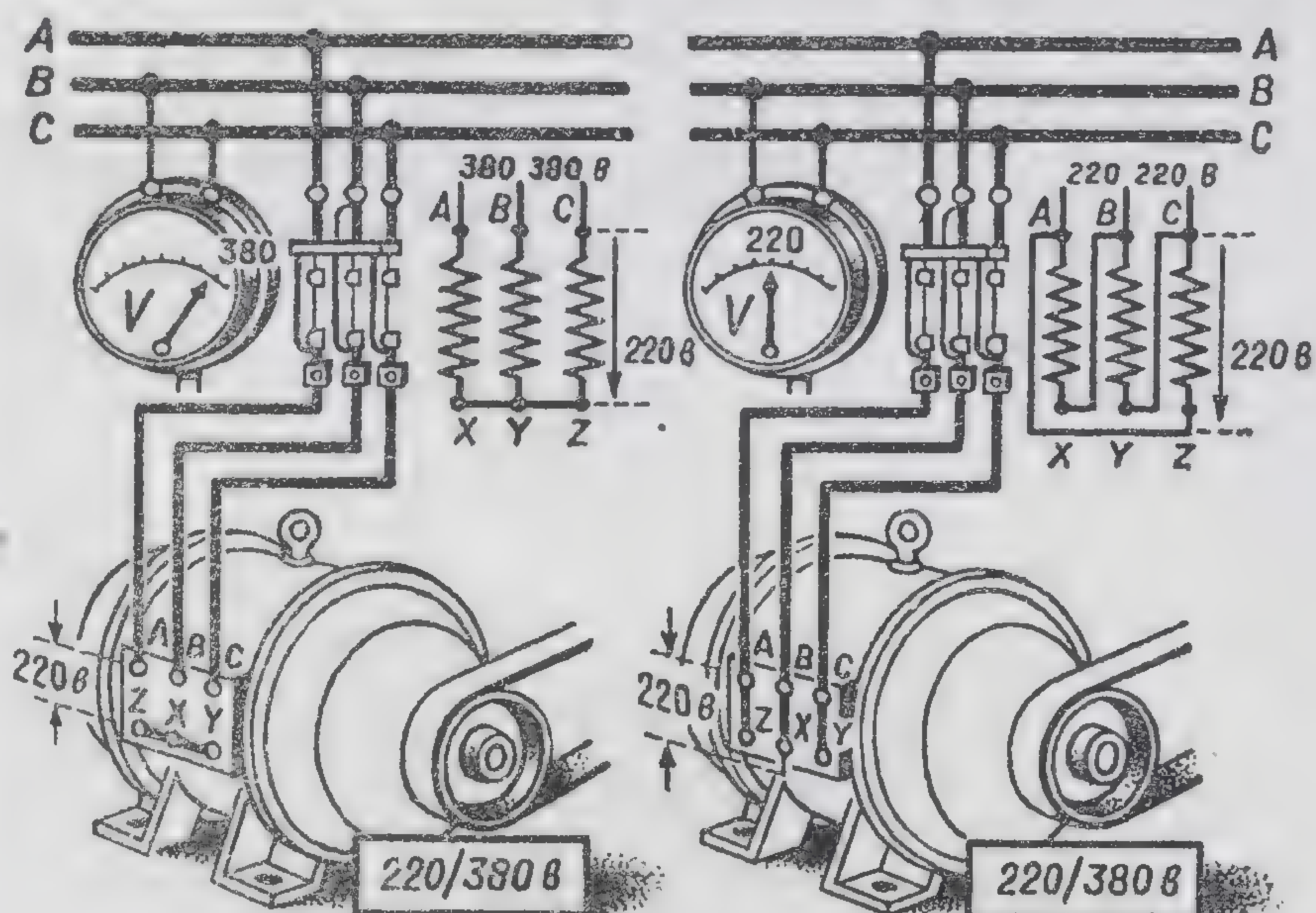


Эквивалентный треугольник

$Z_\Delta = 3Z_\lambda$ ом

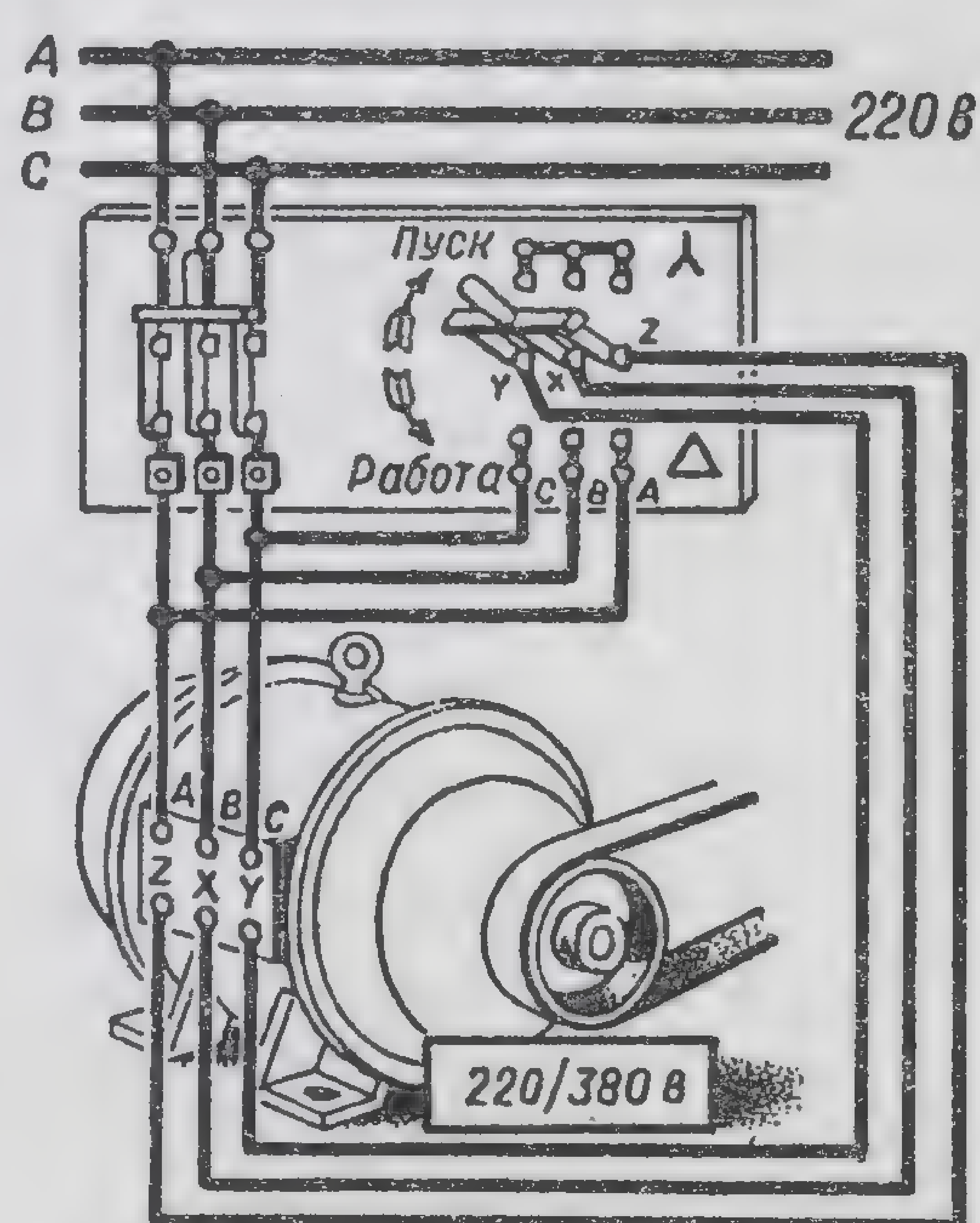
Сопротивление фазы эквивалентного треугольника.

Преобразование симметричной звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник



Соединение звездой Соединение треугольником
(фазовое напряжение одинаково)

Соединение обмоток трехфазного двигателя звездой или треугольником в соответствии с напряжением сети и номинальным напряжением двигателя.

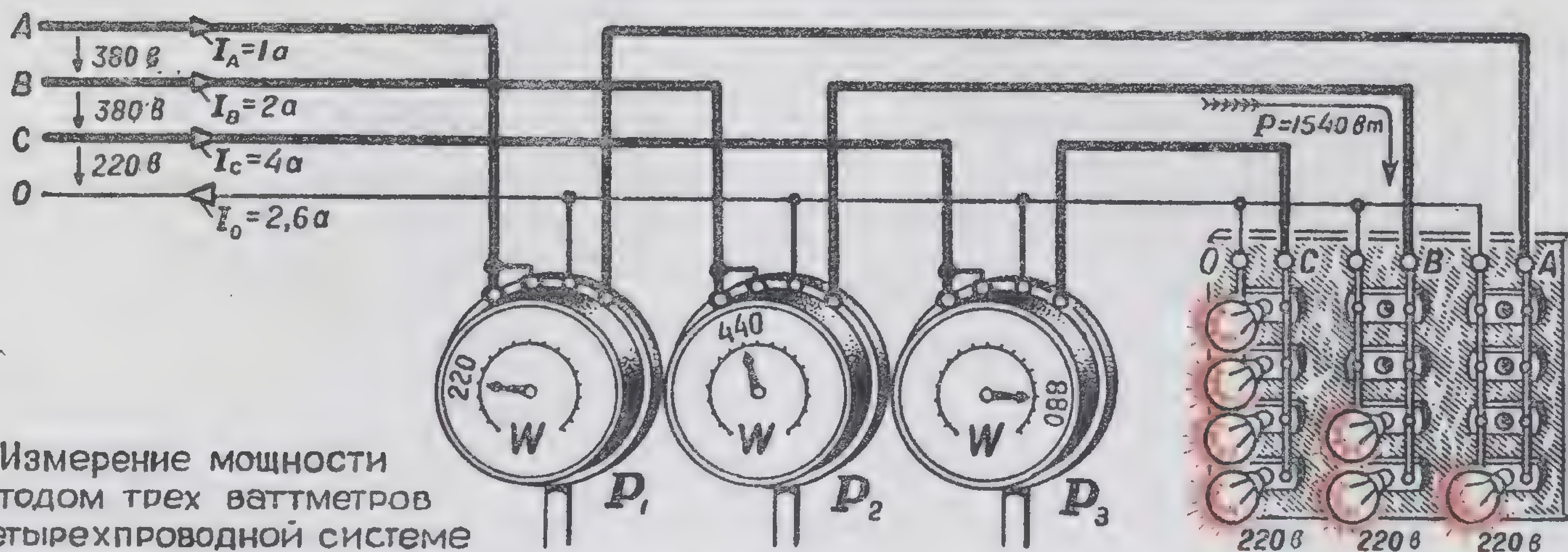


Пуск в ход трехфазного двигателя путем переключения его обмоток со звезды (пусковой режим) на треугольник (рабочий режим)

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ



Измерение мощности методом трех ваттметров в четырехпроводной системе при произвольной (симметричной или несимметричной) нагрузке

Несимметричная нагрузка

Несимметричная нагрузка

$$P=P_{1ф}+P_{2ф}+P_{3ф}=\Sigma U_ф I_ф \cos\varphi \quad вт$$

Активная мощность

$$P_r=P_{1r}+P_{2r}+P_{3r}=\Sigma U_ф I_ф \sin\varphi \quad вар$$

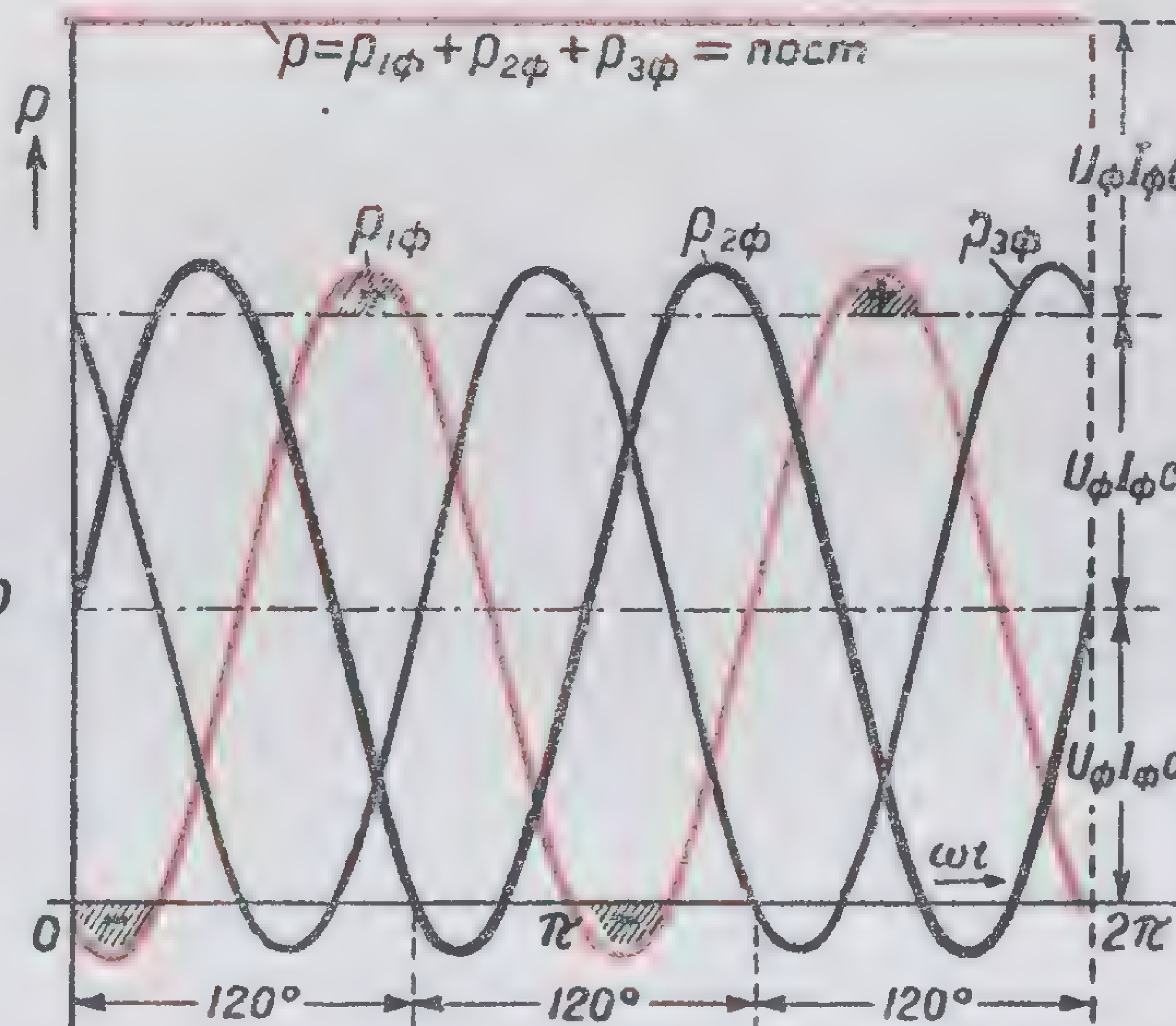
Реактивная мощность

$$P_i=\sqrt{P^2+P_r^2} \quad ва$$

Кажущаяся мощность

$$\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{P^2+P_r^2}}$$

Коэффициент мощности



$$p=p_{1ф}+p_{2ф}+p_{3ф}=3U_ф I_ф \cos\varphi=\sqrt{3}UI\cos\varphi=P=const \quad вт$$

Мгновенная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке является постоянной величиной

Симметричная нагрузка

$$P=3P_ф=3U_ф I_ф \cos\varphi=\sqrt{3}UI\cos\varphi \quad вт$$

Активная мощность

$$P_r=3U_ф I_ф \sin\varphi=\sqrt{3}UI\sin\varphi \quad вар$$

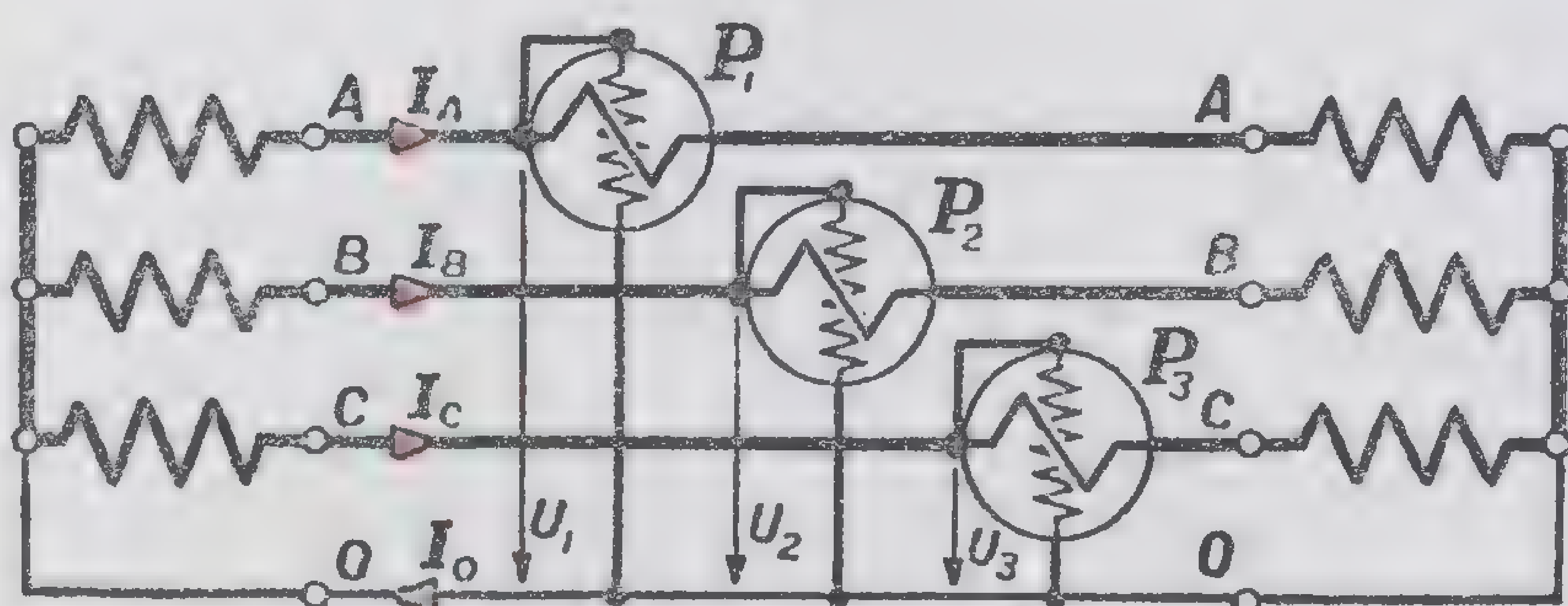
Реактивная мощность

$$P_к=3U_ф I_ф=\sqrt{3}UI \quad ва$$

Кажущаяся мощность

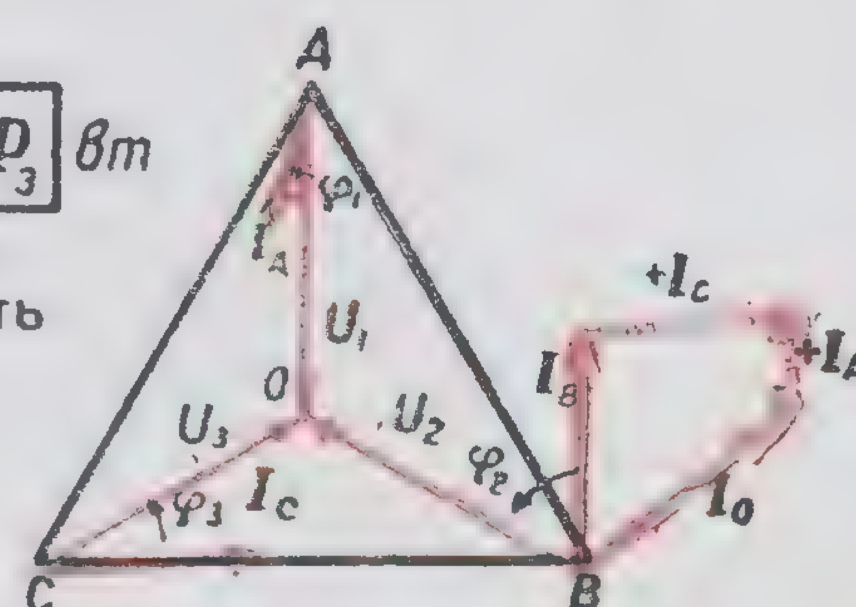
$$\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{3}UI}$$

Коэффициент мощности



$$P=P_1+P_2+P_3 \quad вт$$

Общая мощность

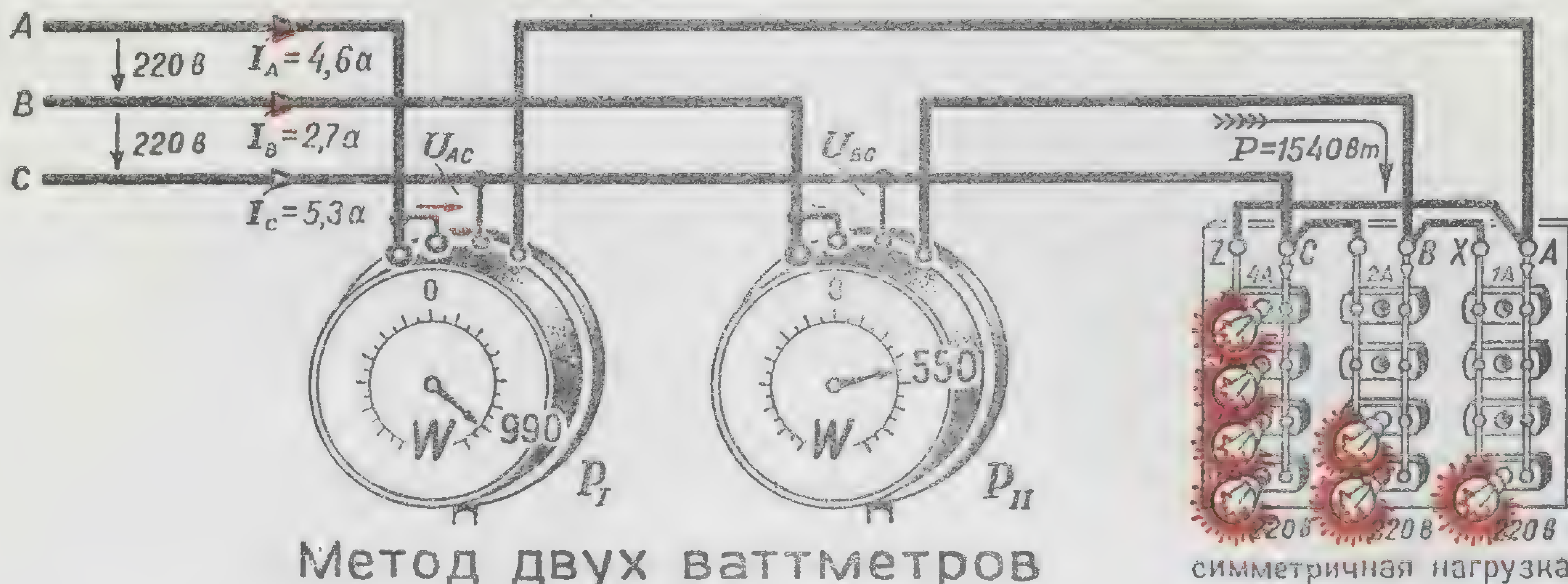


Метод трех ваттметров в четырехпроводной системе

Э. И. Расовский

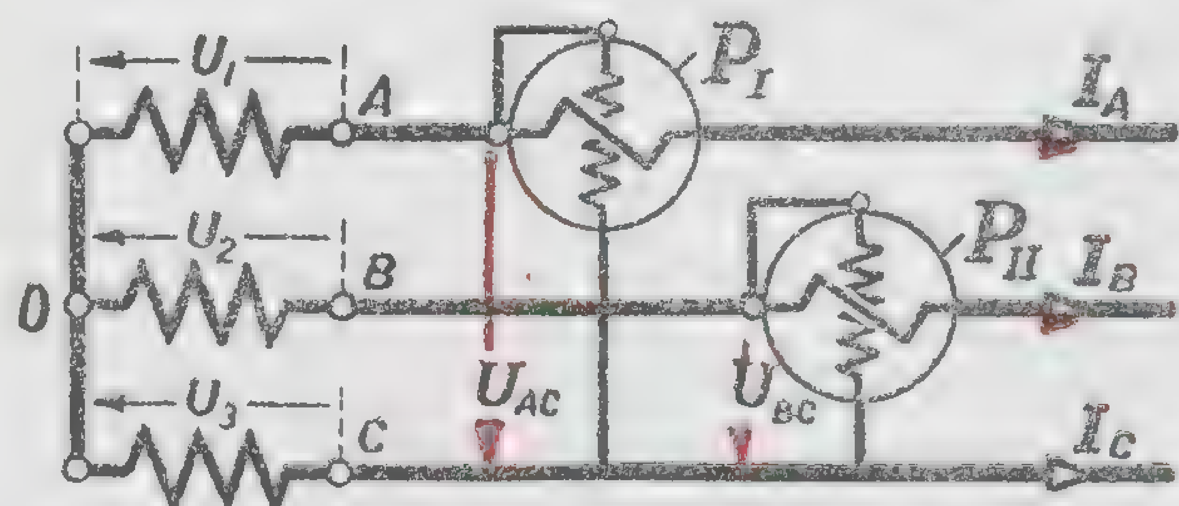
Худ. А. Меньшиков

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ



Метод двух ваттметров
в трехпроводной системе

симметричная нагрузка



Схема

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = u_1 i_A + u_2 i_B - u_3 (i_A + i_B) = (u_1 - u_3) i_A + (u_2 - u_3) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B = p_I + p_{II} \text{ вт}$$

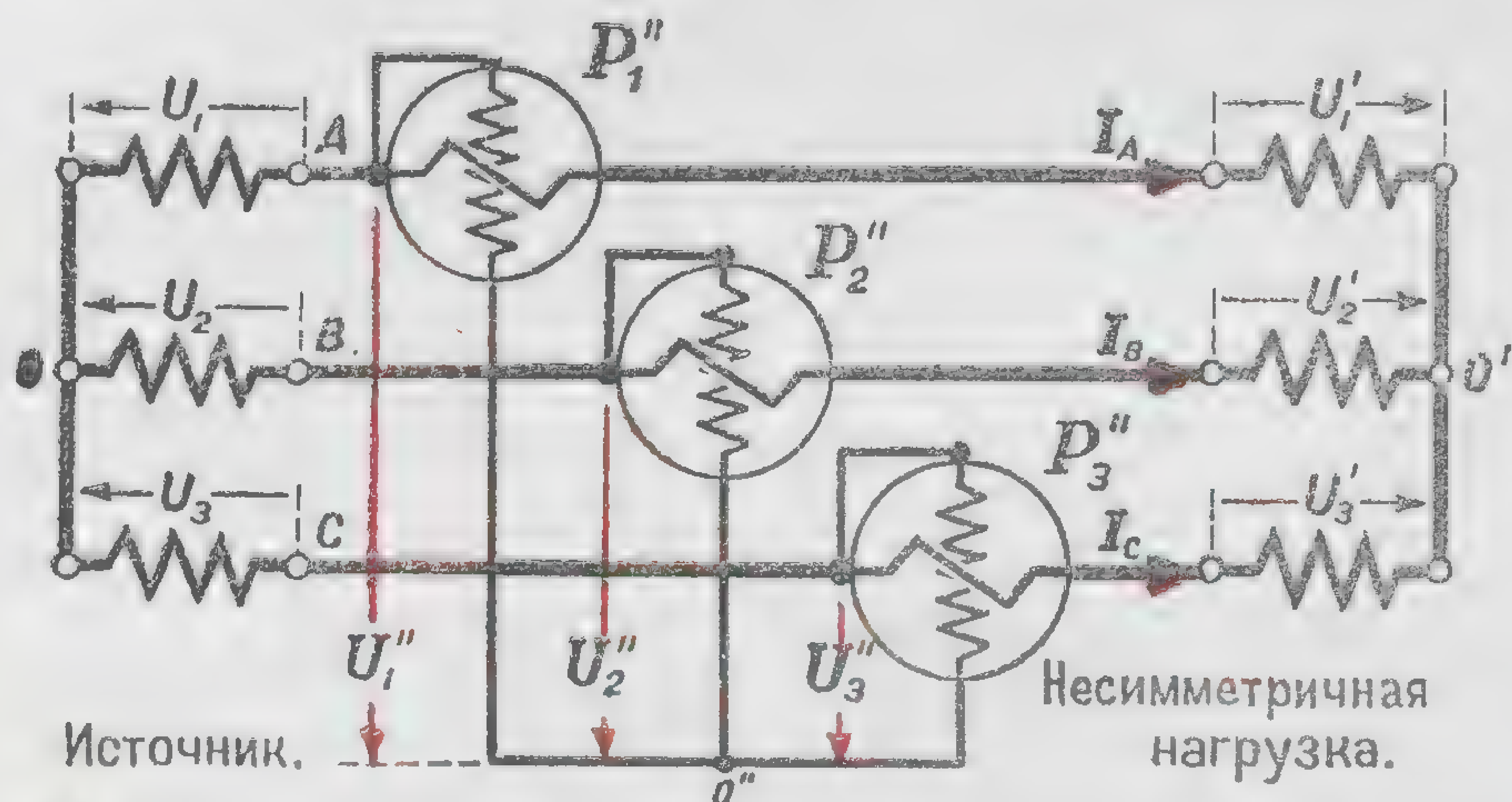
мгновенная

$$P = P_I + P_{II} \text{ вт}$$

активная

Общая мощность.

Мощность трехфазной трехпроводной системы при произвольной, симметричной или несимметричной, нагрузке равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров



Метод трех ваттметров в трехпроводной системе
(имеет ограниченное применение)



$$p_1 + p_2 + p_3 = u_1 i_A + u_2 i_B + u_3 i_C = u_1'' i_A + u_2'' i_B + u_3'' i_C + u_{o''o}(i_A + i_B + i_C) = p_1'' + p_2'' + p_3'' \text{ вт}$$

мгновенная

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_1' + P_2' + P_3' = P_1'' + P_2'' + P_3'' \text{ вт}$$

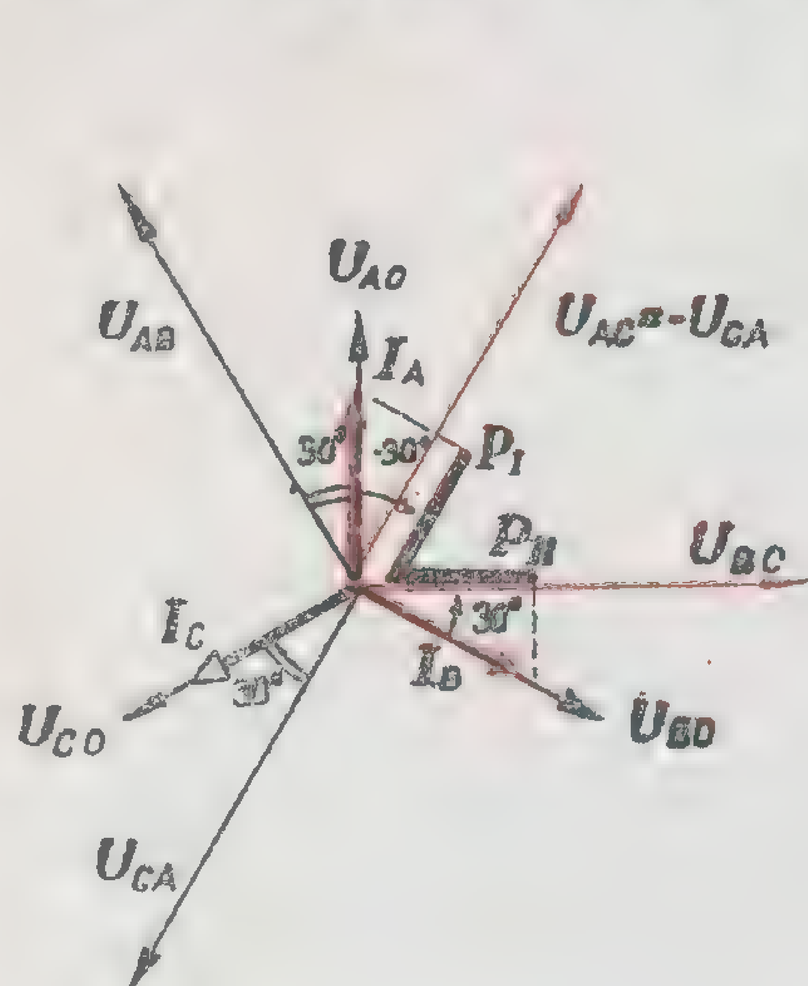
активная

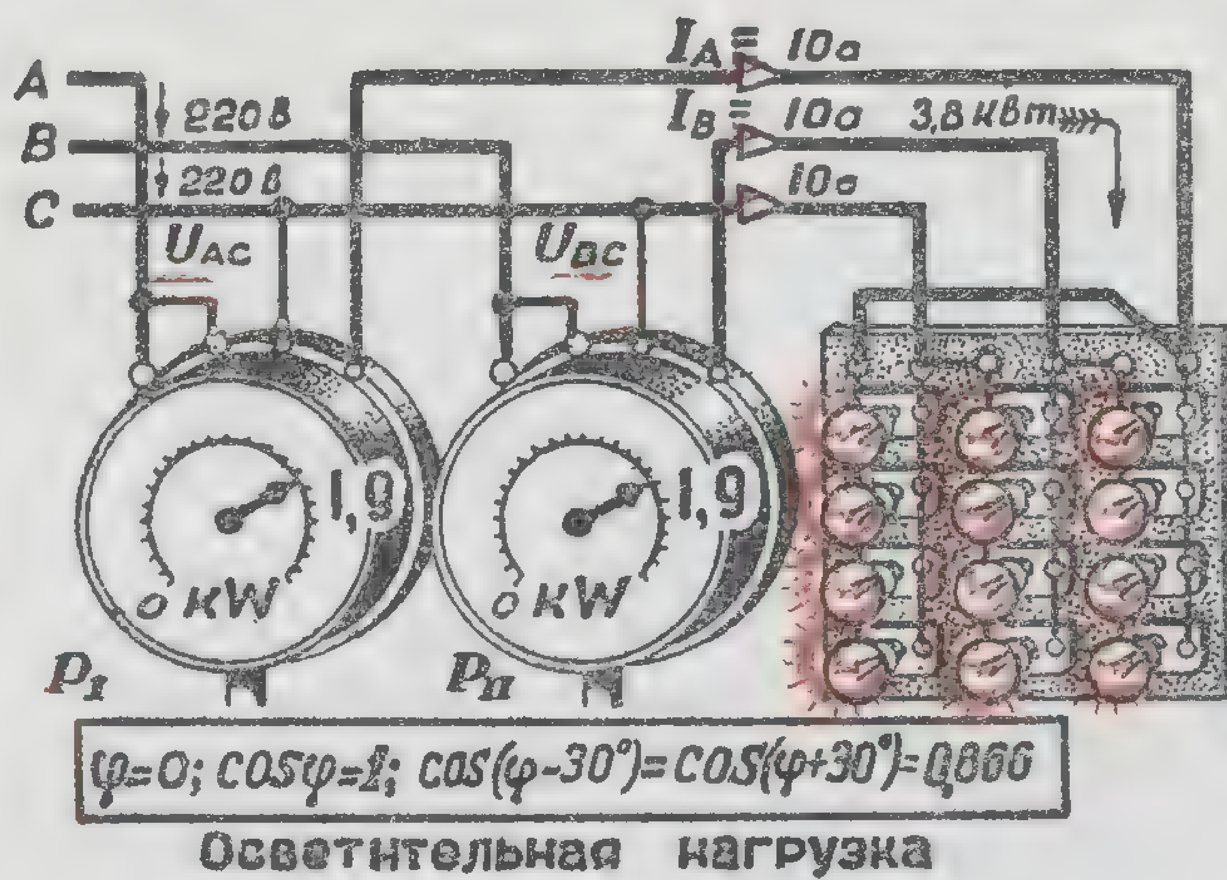
Общая мощность.

Метод двух ваттметров является частным случаем метода трех ваттметров, когда $U_3''=0$ ($R_{V3}''=0$).

Э.И. Расовский

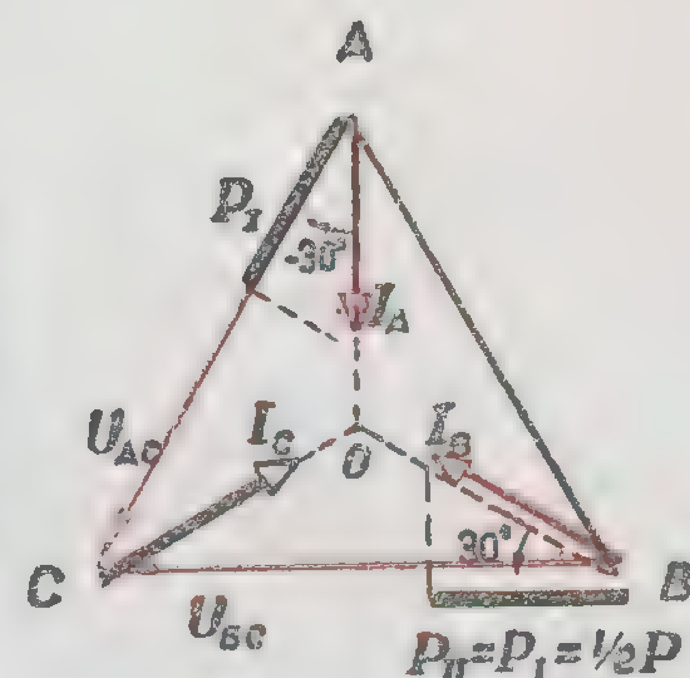
МЕТОД ДВУХ ВАТТМЕТРОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

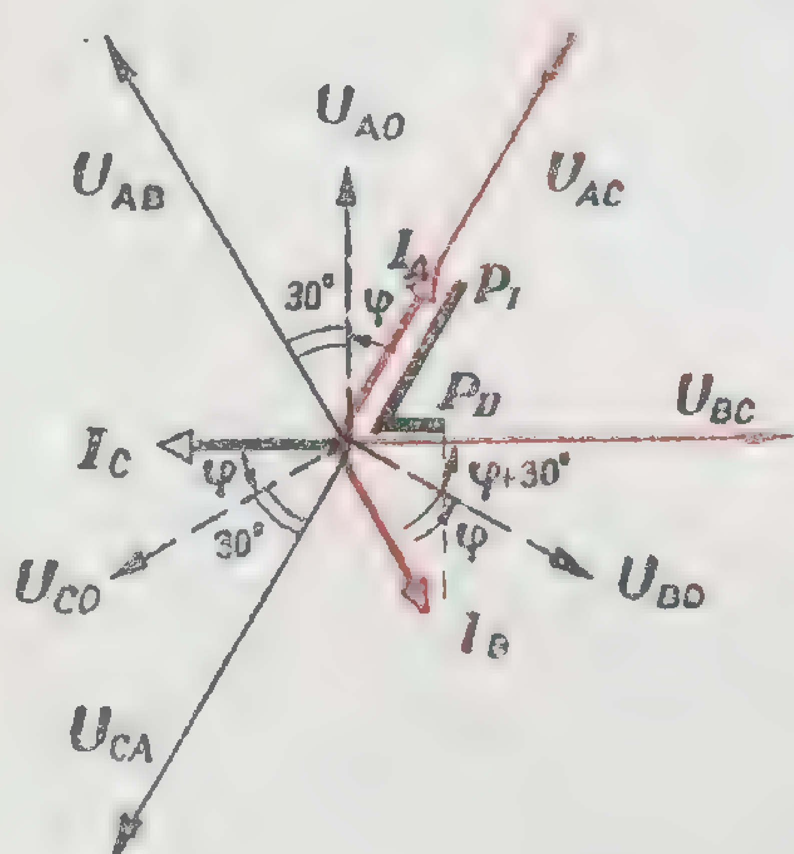


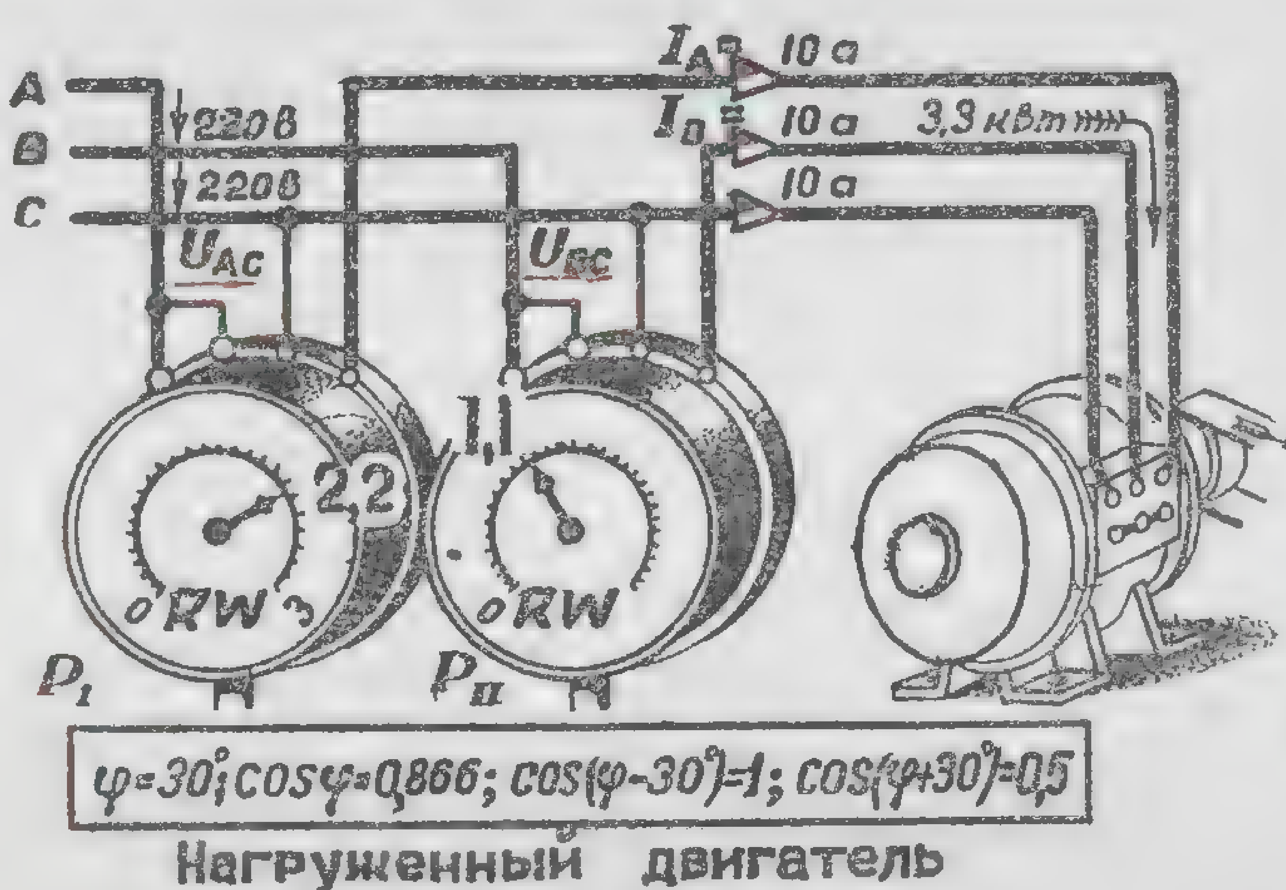


$\varphi=0;\ \cos\varphi=1;\ \cos(\varphi-30°)=\cos(\varphi+30°)=0{,}866$

Осветительная нагрузка

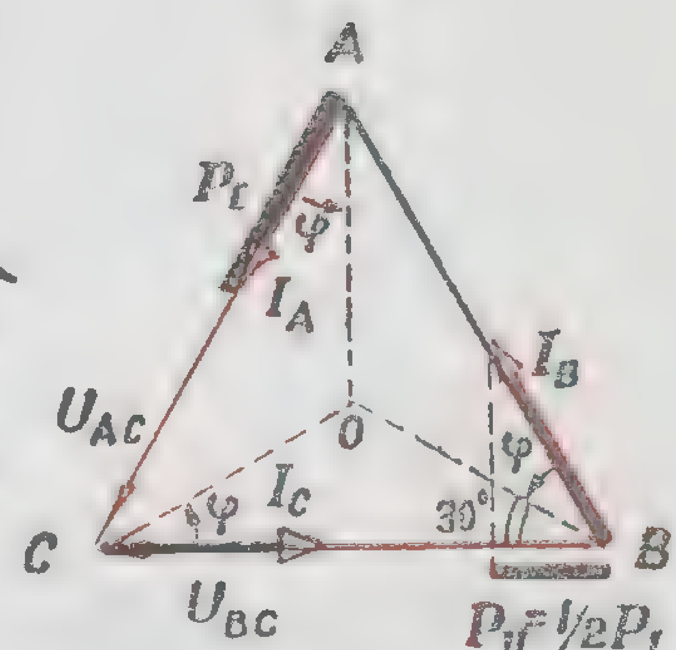


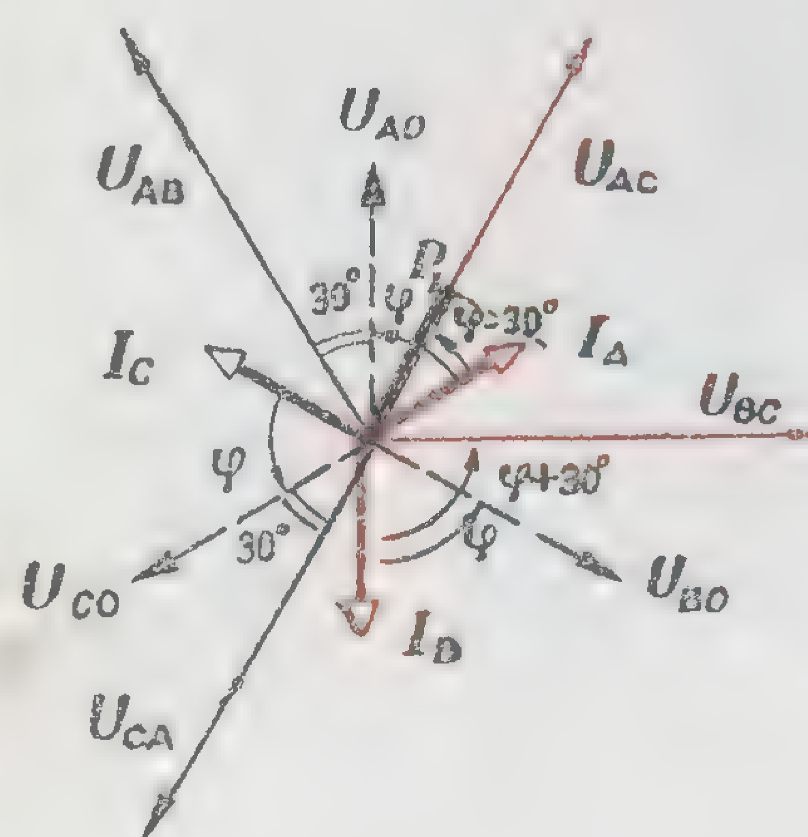


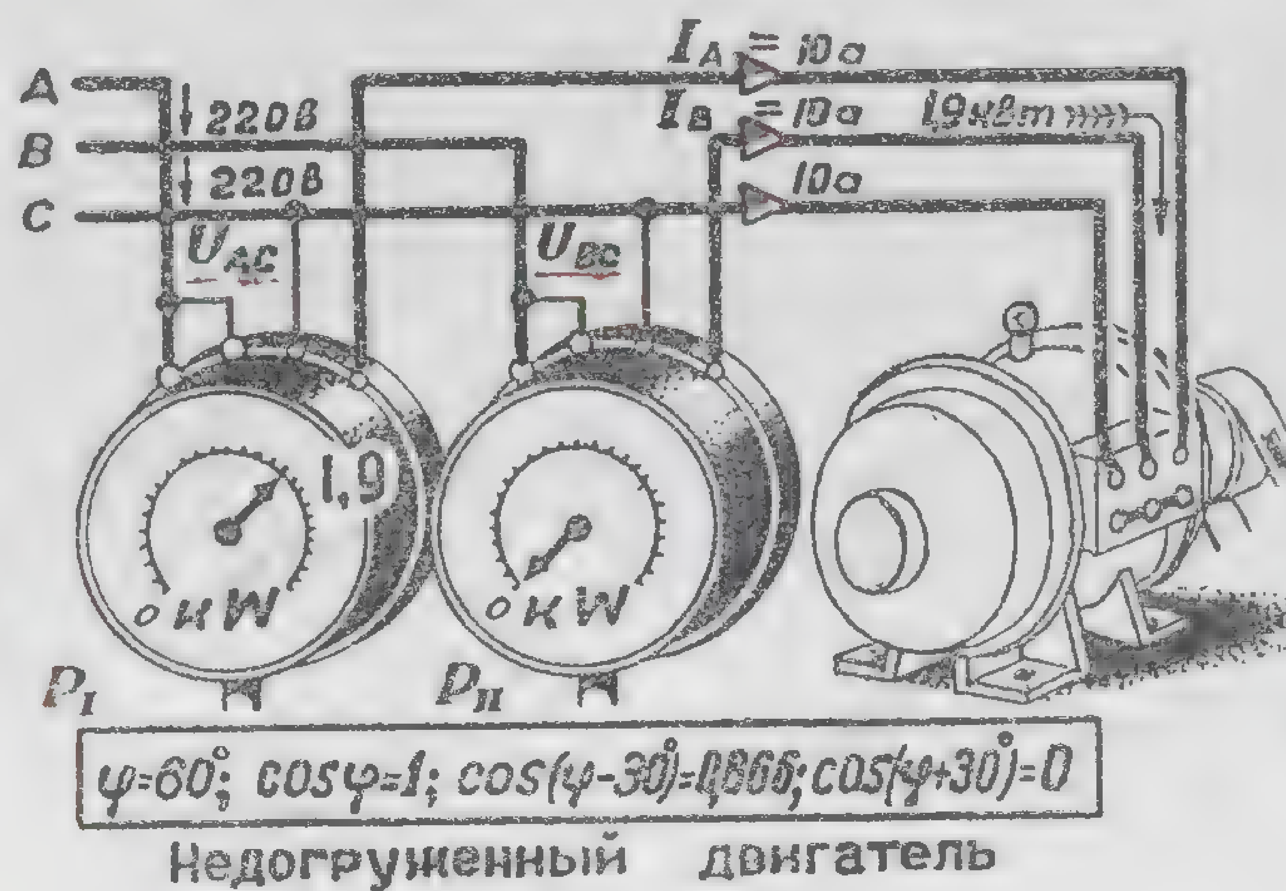


$\varphi=30°;\ \cos\varphi=0{,}866;\ \cos(\varphi-30°)=1;\ \cos(\varphi+30°)=0{,}5$

Нагруженный двигатель

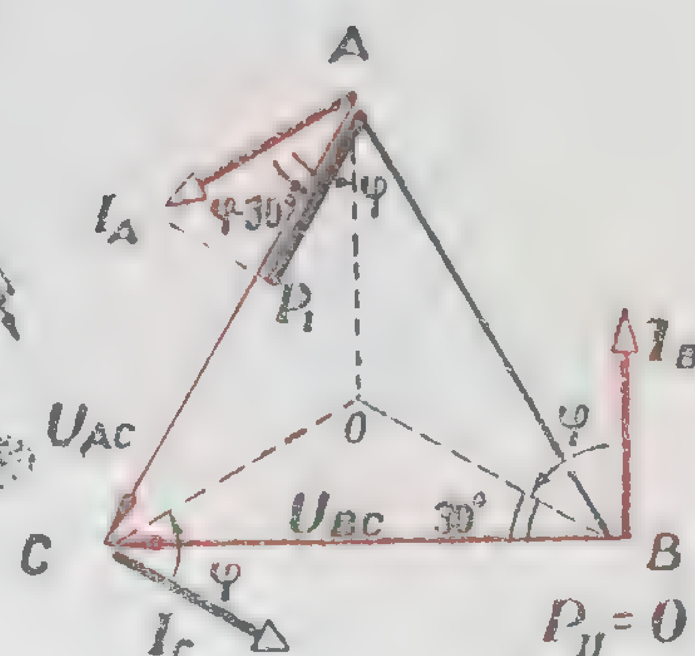


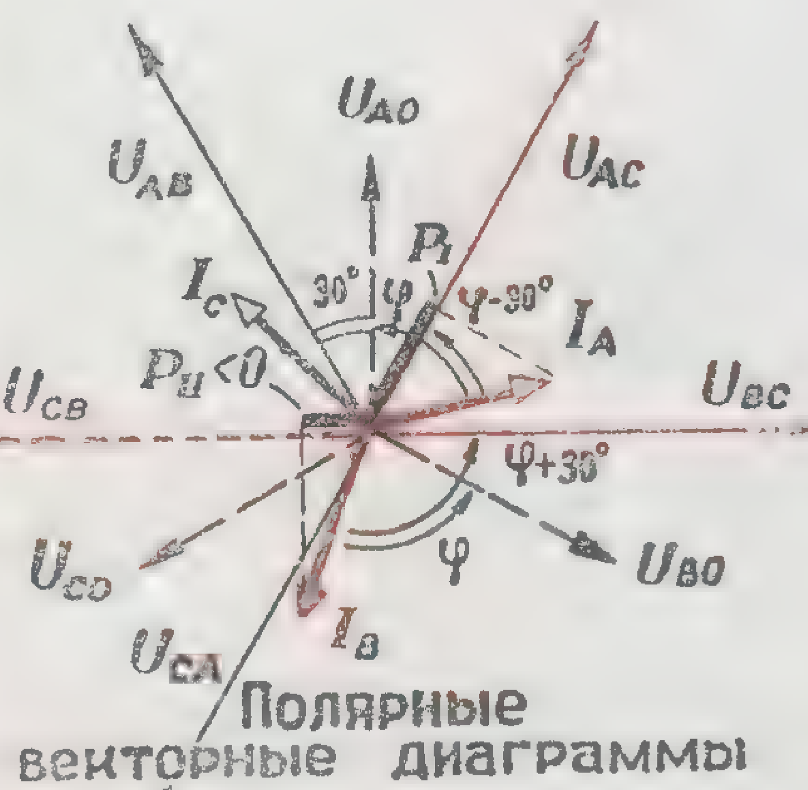


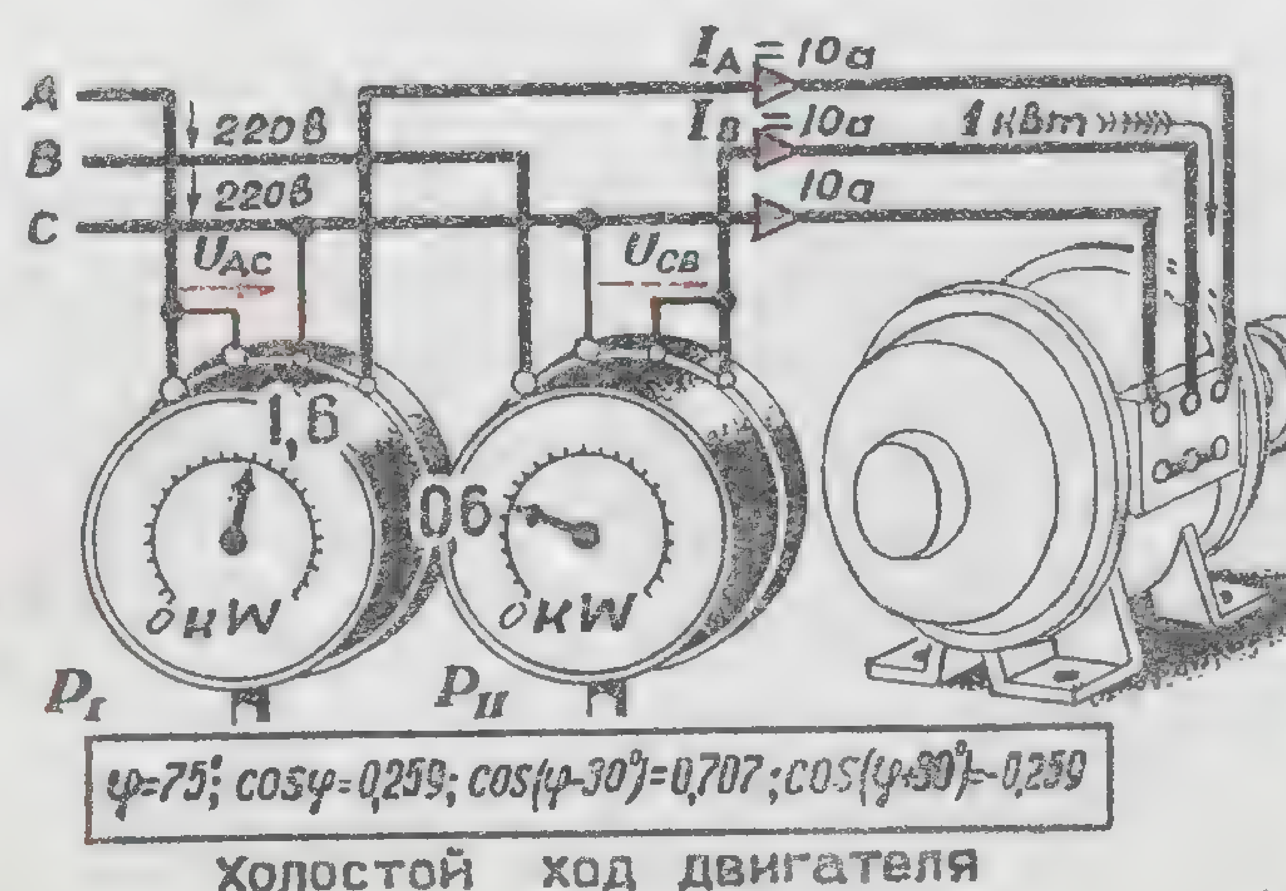


$\varphi=60°;\ \cos\varphi=1;\ \cos(\varphi-30°)=0{,}866;\ \cos(\varphi+30°)=0$

Недогруженный двигатель

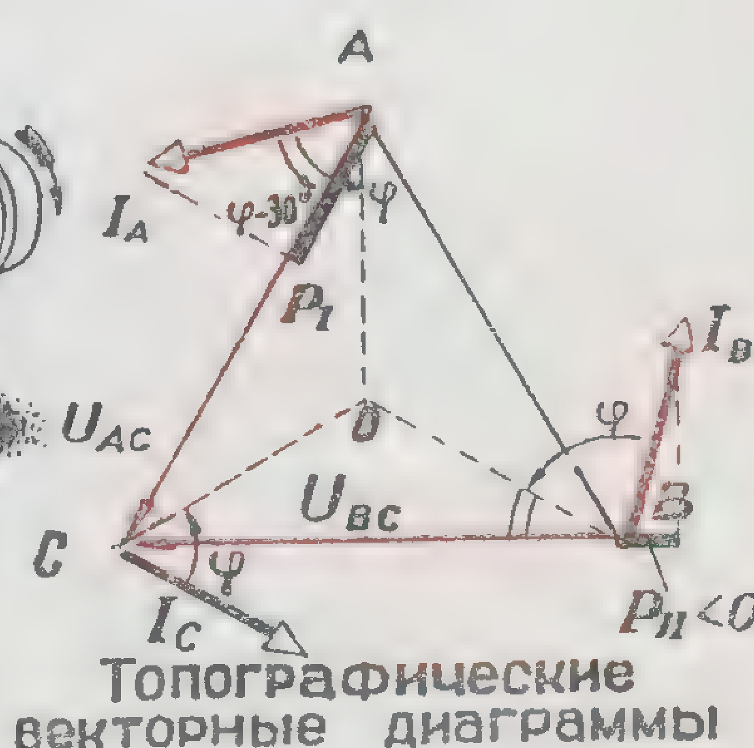






$\varphi=75°;\ \cos\varphi=0{,}259;\ \cos(\varphi-30°)=0{,}707;\ \cos(\varphi+30°)=-0{,}259$

Холостой ход двигателя



Полярные векторные диаграммы

Топографические векторные диаграммы

$P_I=U_{AC} I_A \cos(\varphi-30°)$ вт $P_{II}=U_{BC} I_B \cos(\varphi+30°)$ вт

Показания ваттметров

$P_I+P_{II}=\sqrt{3}\,UI\cos\varphi=P$ вт

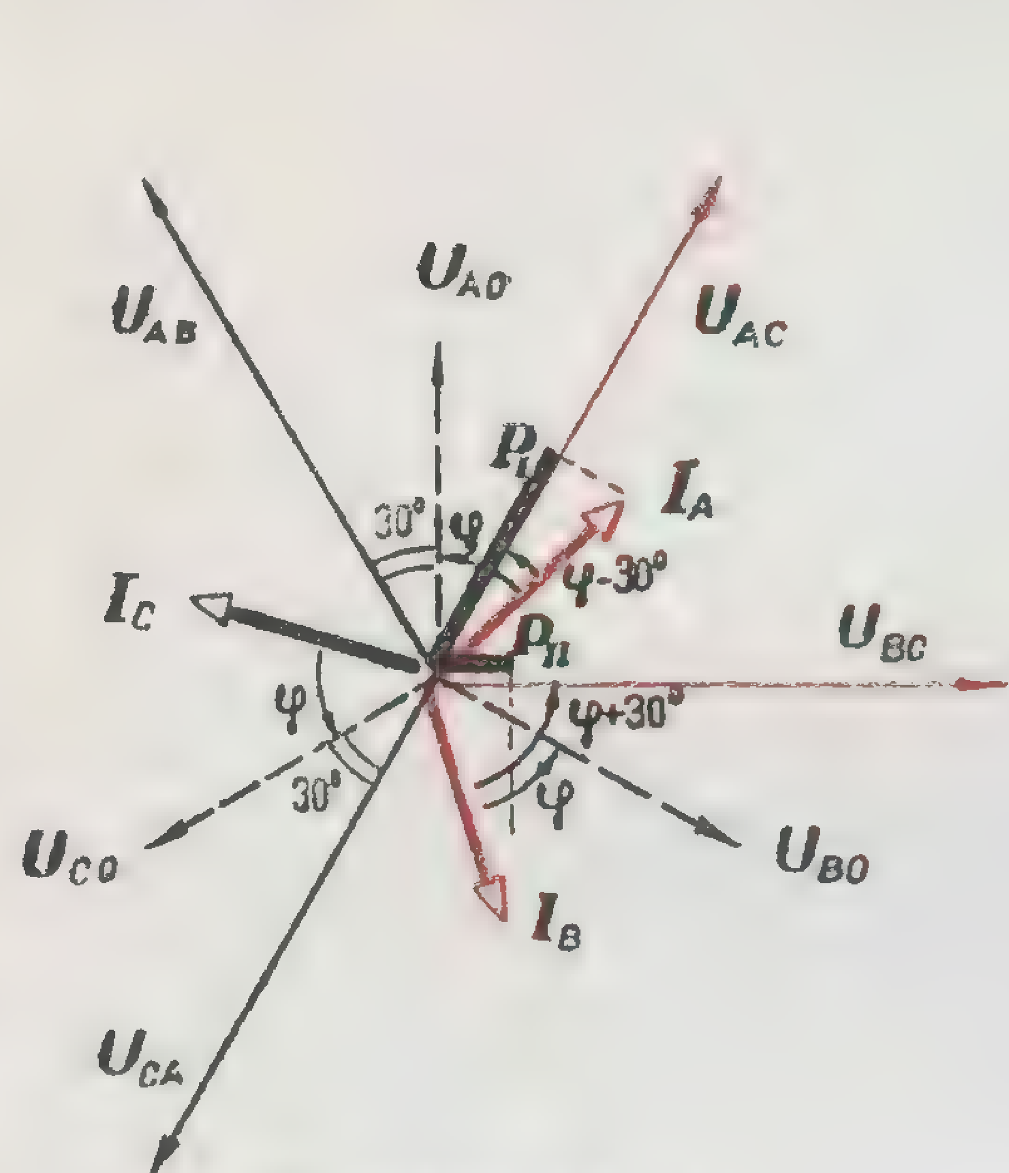
Сумма показаний

$P_I-P_{II}=UI\sin\varphi=\frac{P_r}{\sqrt{3}}$ вар

Разность показаний

З.И. Расовский.

МЕТОД ДВУХ ВАТТМЕТРОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ
(ПРОДОЛЖЕНИЕ)


Полярная векторная диаграмма

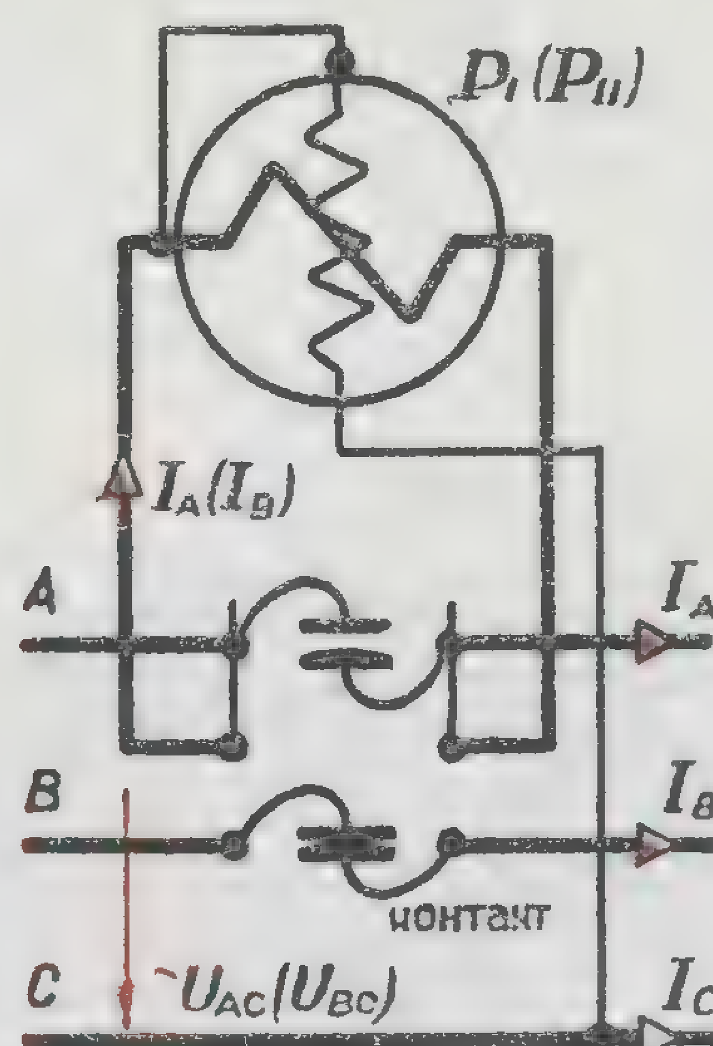
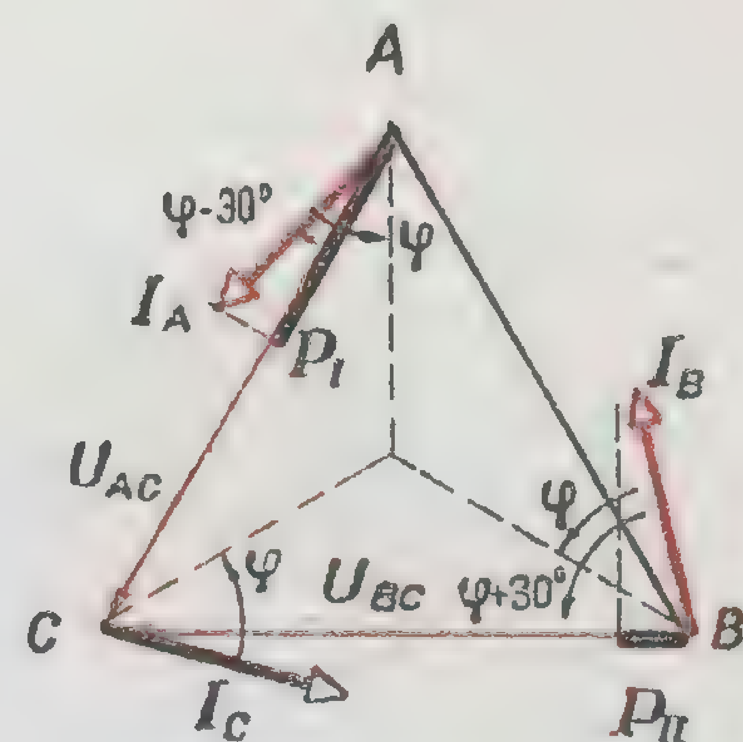


Схема с переключателем токовой обмотки ваттметра


Топографическая векторная диаграмма

$P_I = UI\cos(\varphi - 30°)$ вт $P_{II} = UI\cos(\varphi + 30°)$ вт

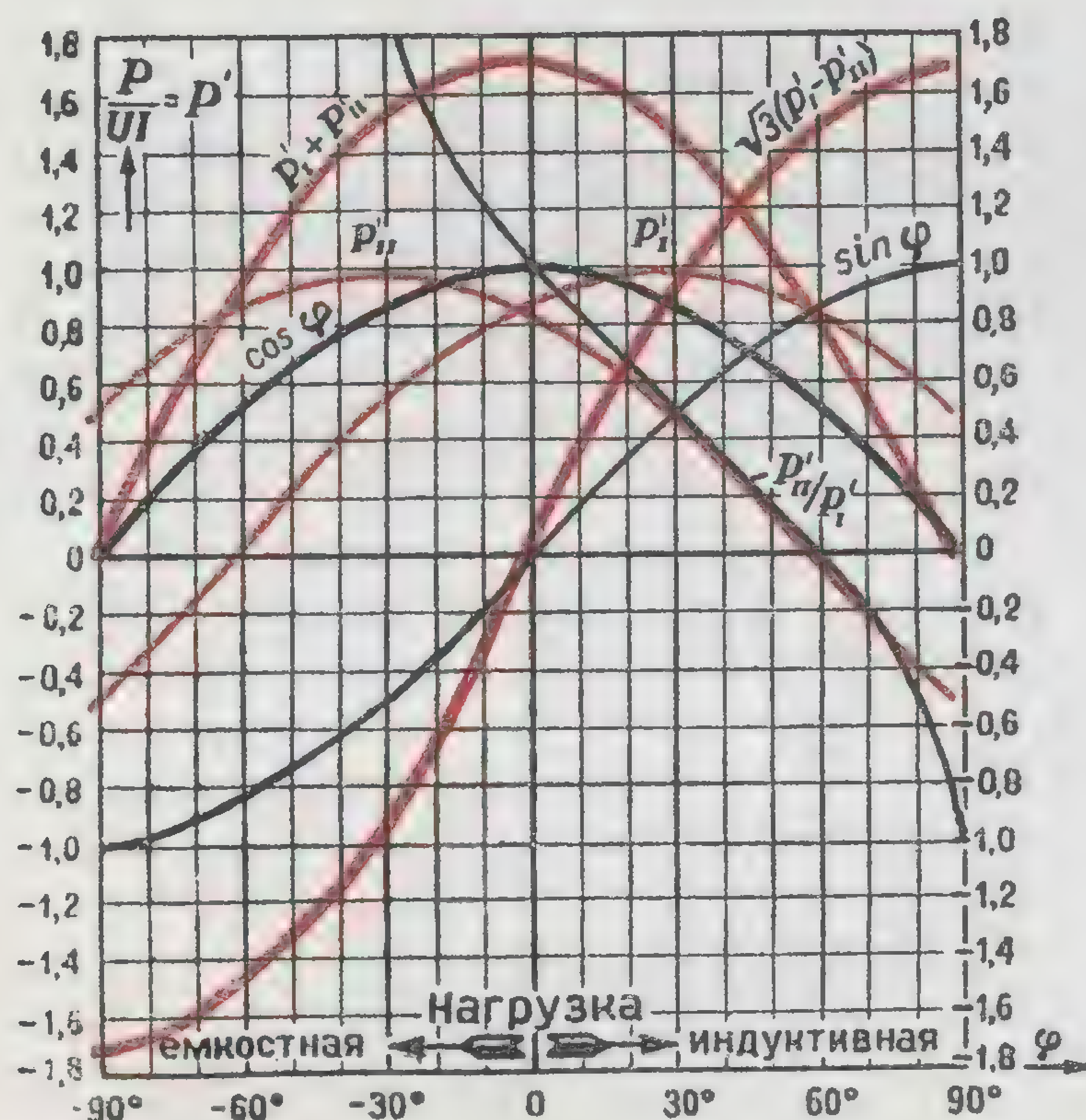
Показания ваттметров

$P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi = P_I + P_{II}$ вт

Активная мощность

$P_r = \sqrt{3}\,UI\sin\varphi = \sqrt{3}(P_I - P_{II})$ вар

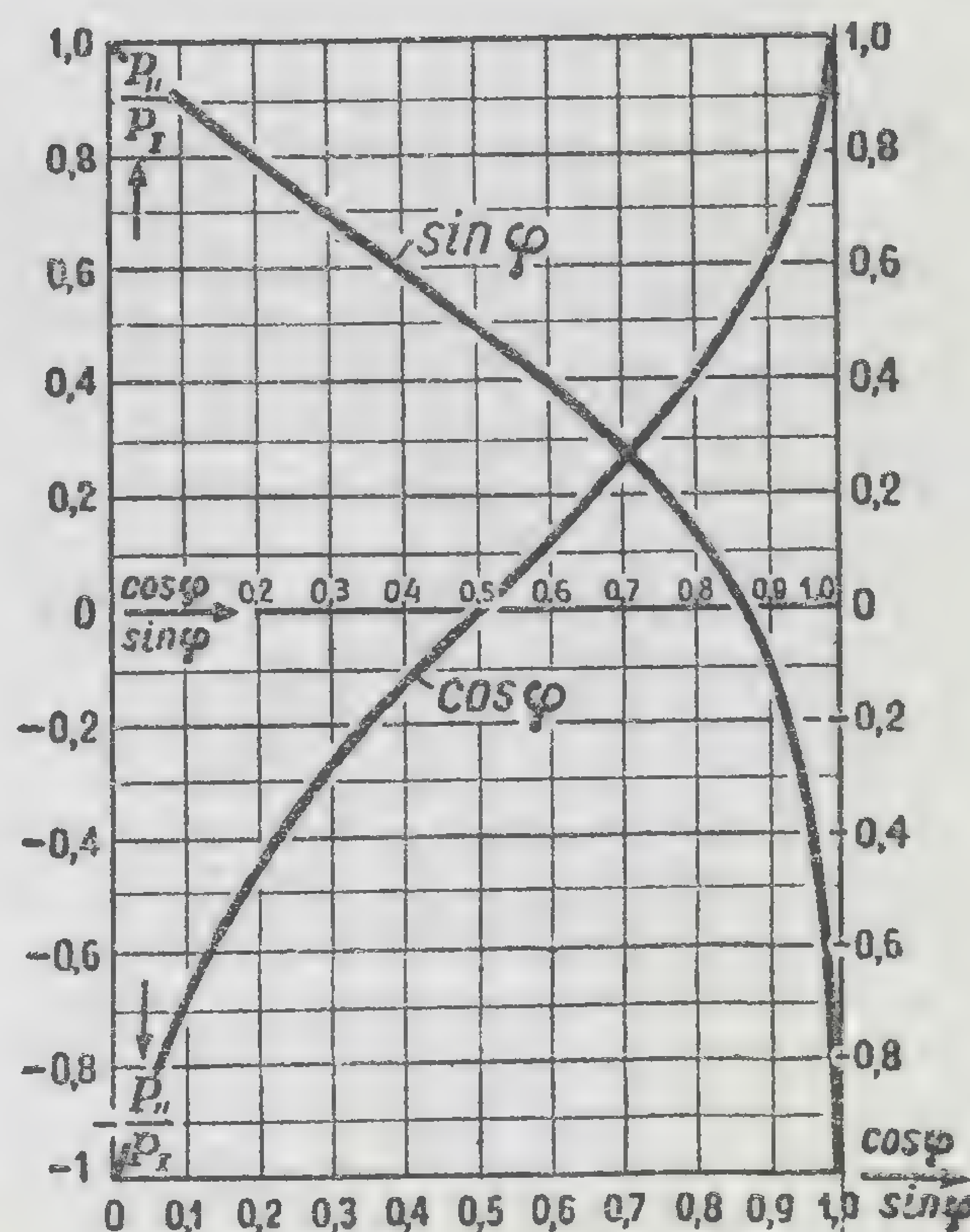
Реактивная мощность



$P'_I = \frac{P_I}{UI} = \cos(\varphi - 30°)$; $P'_{II} = \frac{P_{II}}{UI} = \cos(\varphi + 30°)$;

$P'_I + P'_{II} = \sqrt{3}\cos\varphi$; $\sqrt{3}(P'_I - P'_{II}) = \sqrt{3}\sin\varphi$

Кривые показаний двух ваттметров

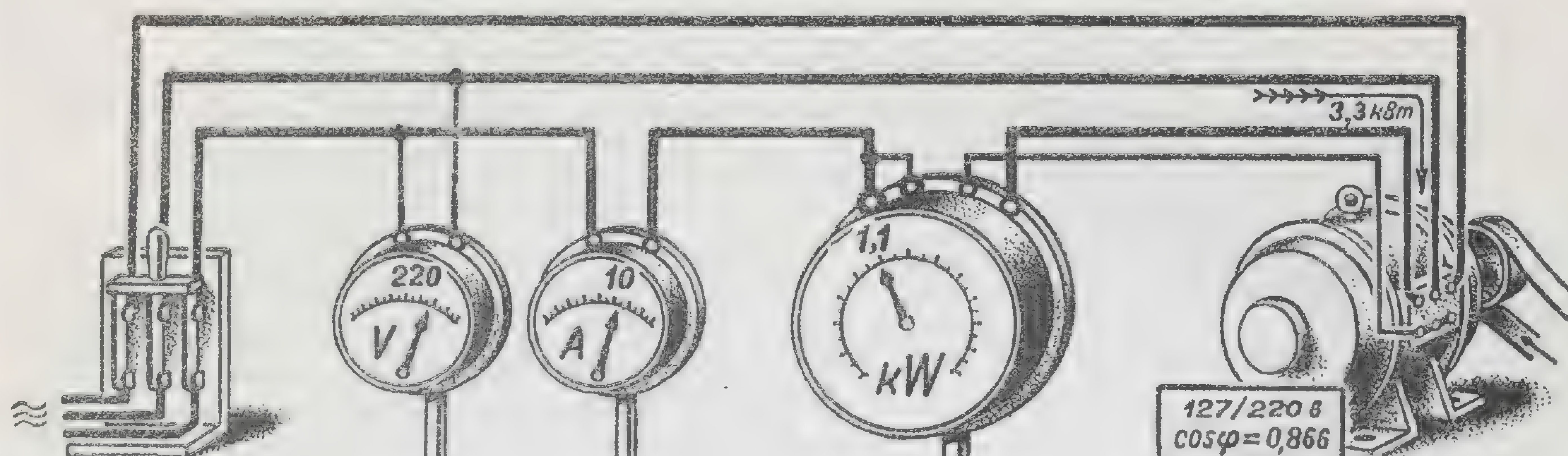


$tg\,\varphi = \sqrt{3}\,\frac{P_I - P_{II}}{P_I + P_{II}} = \sqrt{3}\,\frac{1 - P_{II}/P_I}{1 + P_{II}/P_I}$

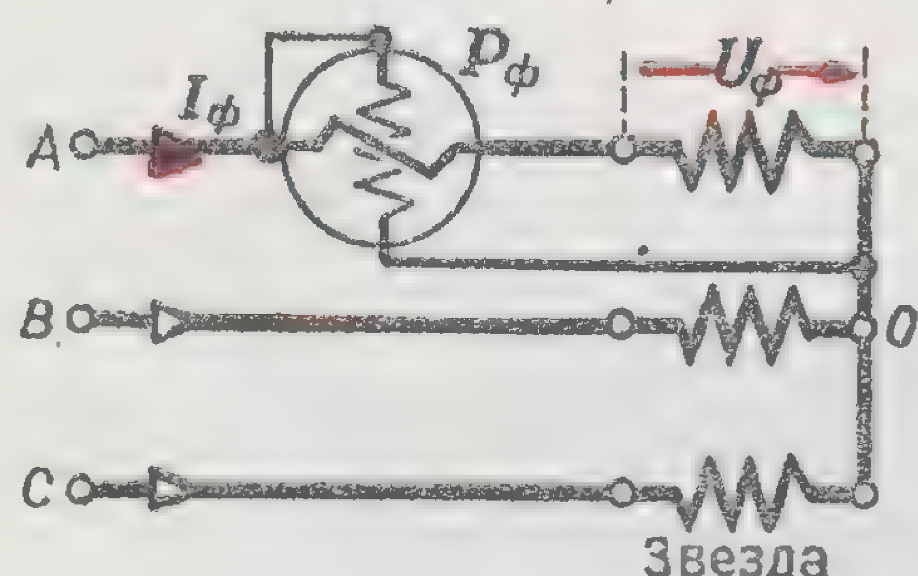
Определение $\cos\varphi$ и $\sin\varphi$ по известному отношению показаний двух ваттметров

Э.И. Расовский

МЕТОД ОДНОГО ВАТТМЕТРА
(СИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ФАЗ)



Измерение мощности одним ваттметром

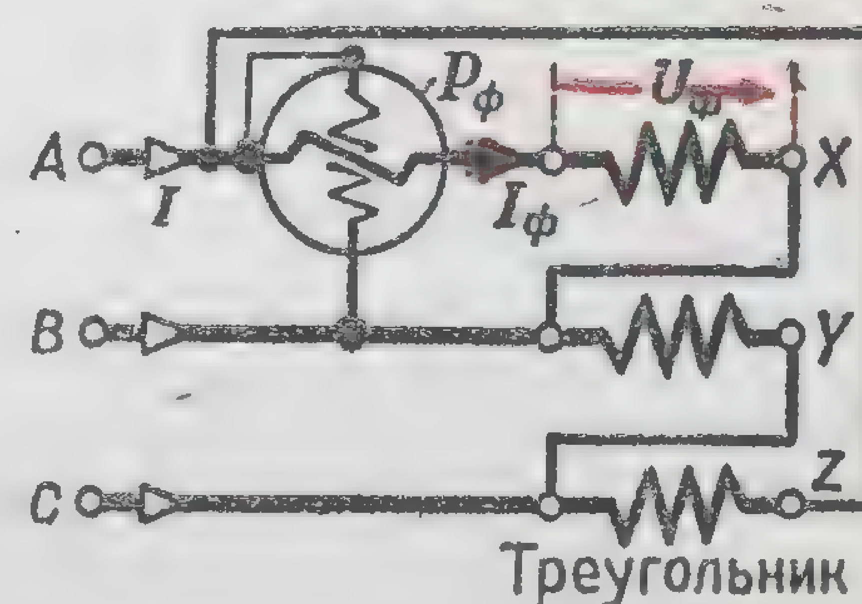


$P_ф = U_ф I_ф \cos\varphi$ вт

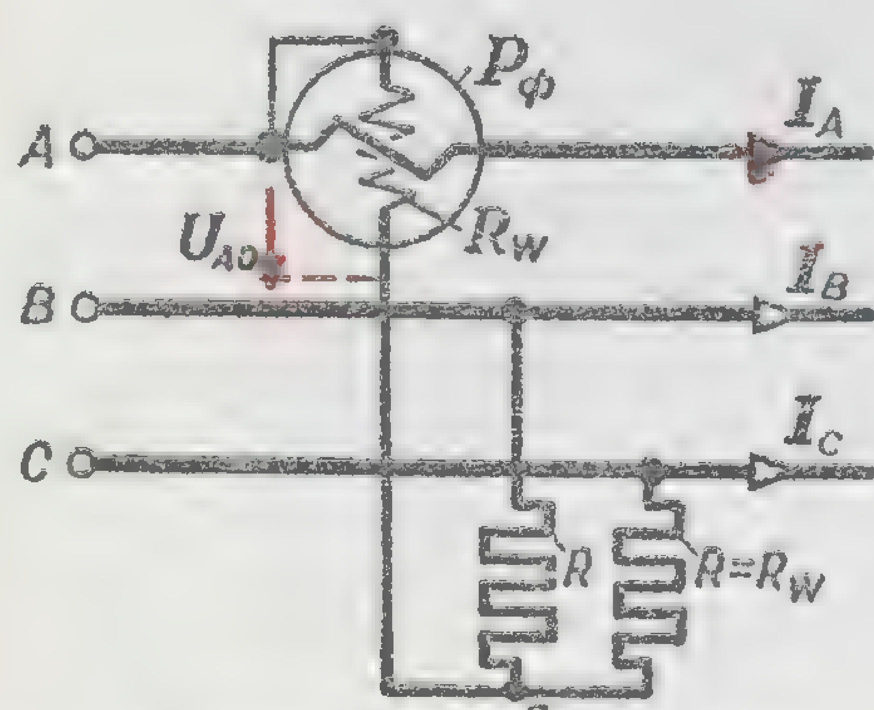
Показание ваттметра

$P = 3P_ф$ вт

Общая мощность



Измерение фазовой мощности

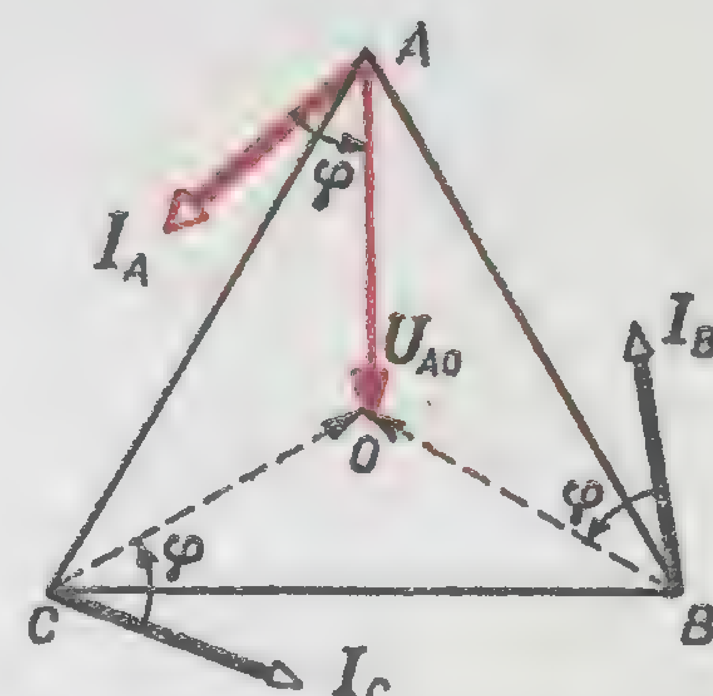


$P_W = U_{A0} I_A \cos\varphi = P_ф$ вт

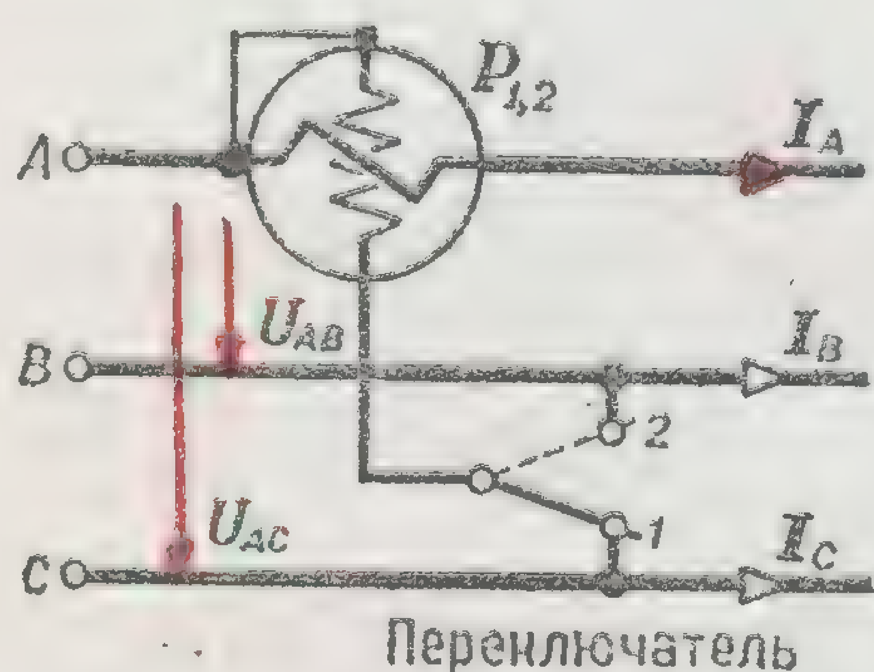
Показание ваттметра

$P = 3P_ф$ вт

Общая мощность



Измерение мощности при помощи искусственной нулевой точки

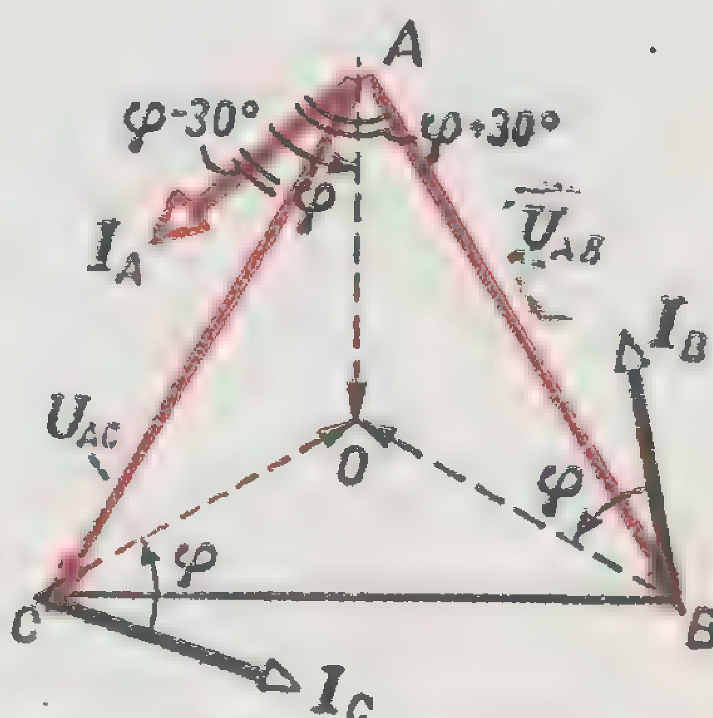


$P_1 = U_{AC} I_A \cos(\varphi - 30^\circ)$
$P_2 = U_{AB} I_A \cos(\varphi + 30^\circ)$ вт

Два показания ваттметра

$P = \sqrt{3} UI \cos\varphi = P_1 + P_2$ вт

Общая мощность



Измерение мощности одним ваттметром путем переключения конца его обмотки напряжения

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

при симметричной системе напряжений: $\dot{U}_{A0}+\dot{U}_{B0}+\dot{U}_{C0}=0$

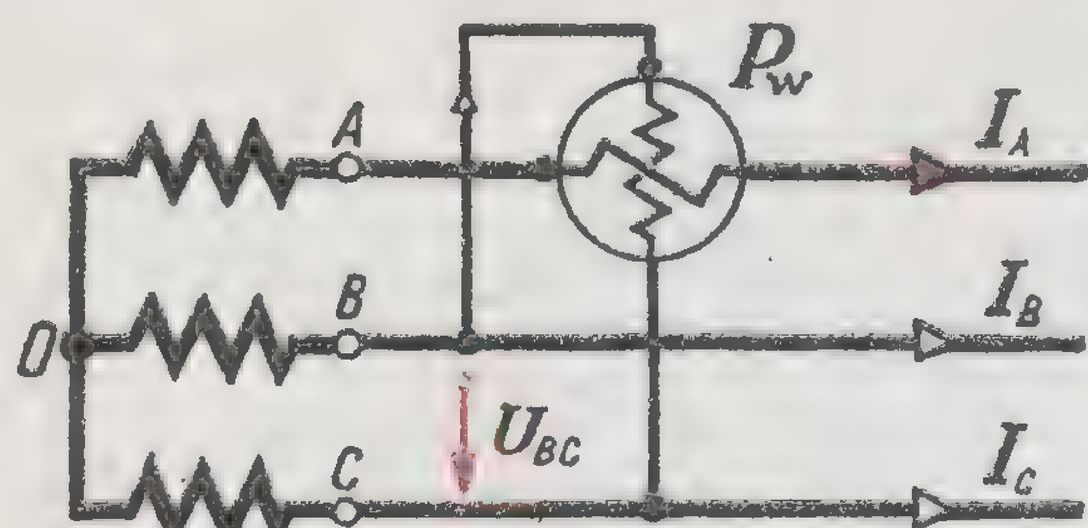
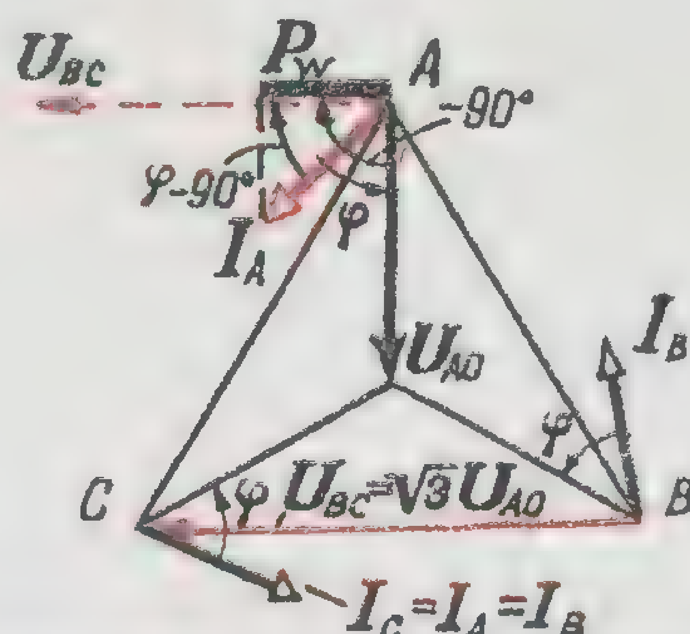


Схема синусного включения активного ваттметра



$P_W=U_{BC}I_A\cos(\widehat{U_{BC}I_A})=$
$=U_{BC}I_A\cos(\varphi-90^\circ)$

Показание ваттметра

$P_r=\sqrt{3}P_W$ вар

Реактивная мощность

$P_r=\sqrt{3}UI\sin\varphi=3U_{A0}I_A\sin\varphi=\sqrt{3}\,U_{BC}I_A\cos(\varphi-90^\circ)$

доказательство

Метод одного ваттметра при симметричной нагрузке фаз

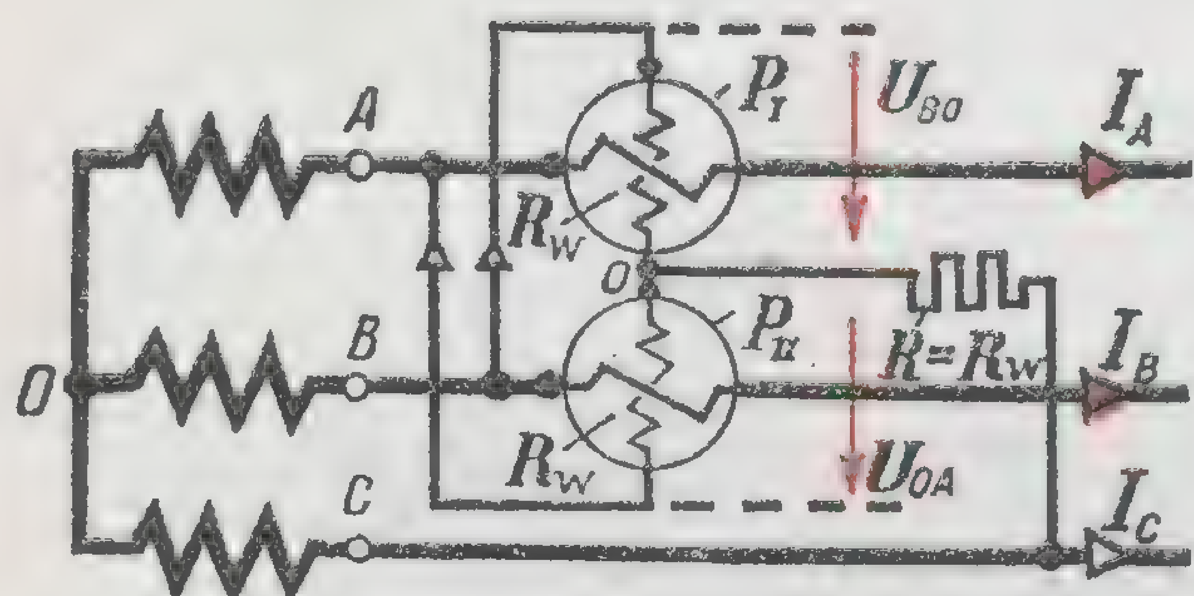
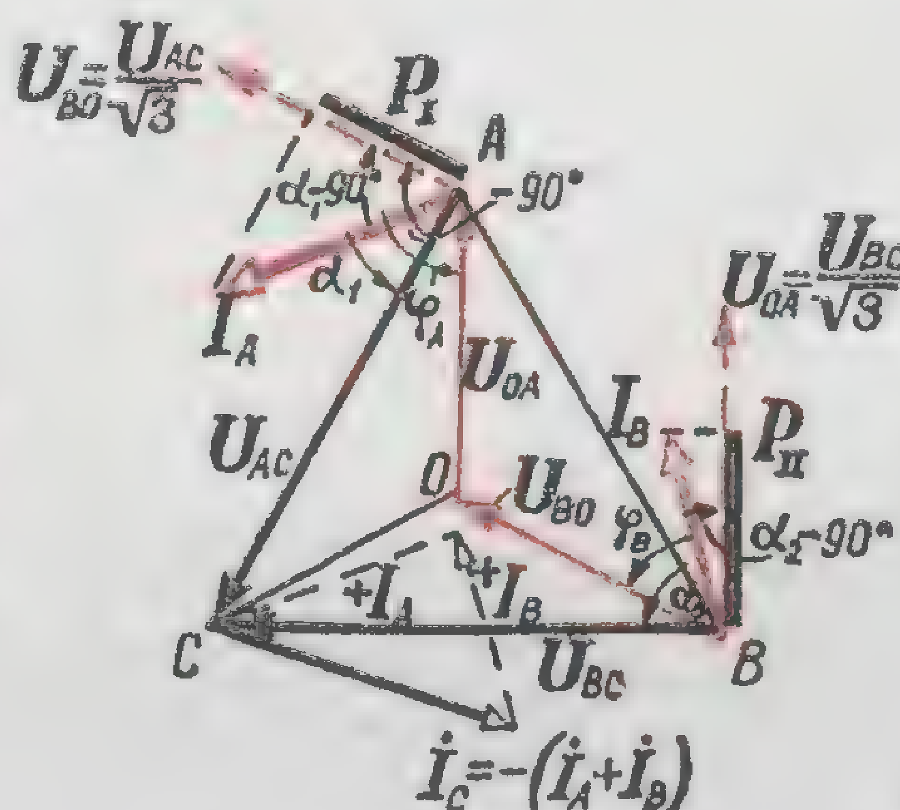


Схема синусного включения двух активных ваттметров с искусственной нулевой точкой



$P_I=U_{B0}I_A\cos(\alpha_1-90^\circ)$
$P_{II}=U_{0A}I_B\cos(\alpha_2-90^\circ)$

Показания ваттметров

$P_r=\sqrt{3}(P_I+P_{II})$ вар

Реактивная мощность

$$\dot{P}=P_a-jP_r=\hat{U}_{A0}\dot{I}_A+\hat{U}_{B0}\dot{I}_B-\hat{U}_{C0}(\dot{I}_A+\dot{I}_B)=(\hat{U}_{A0}-\hat{U}_{C0})\dot{I}_A+(\hat{U}_{B0}-\hat{U}_{C0})\dot{I}_B=\hat{U}_{AC}\dot{I}_A+\hat{U}_{BC}\dot{I}_B=$$
$$=U_{AC}I_A\cos\alpha_1+U_{BC}I_B\cos\alpha_2-j(U_{AC}I_A\sin\alpha_1+U_{BC}I_B\sin\alpha_2).$$

Реактивная мощность: $P_r=U_{AC}I_A\sin\alpha_1+U_{BC}I_B\sin\alpha_2=\sqrt{3}U_{B0}I_A\cos(\alpha_1-90^\circ)+\sqrt{3}\,U_{0A}I_B\cos(\alpha_2-90^\circ)=\sqrt{3}(P_I+P_{II})$

доказательство

Метод двух ваттметров при произвольной нагрузке фаз

(трехпроводная система: $\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=0$)

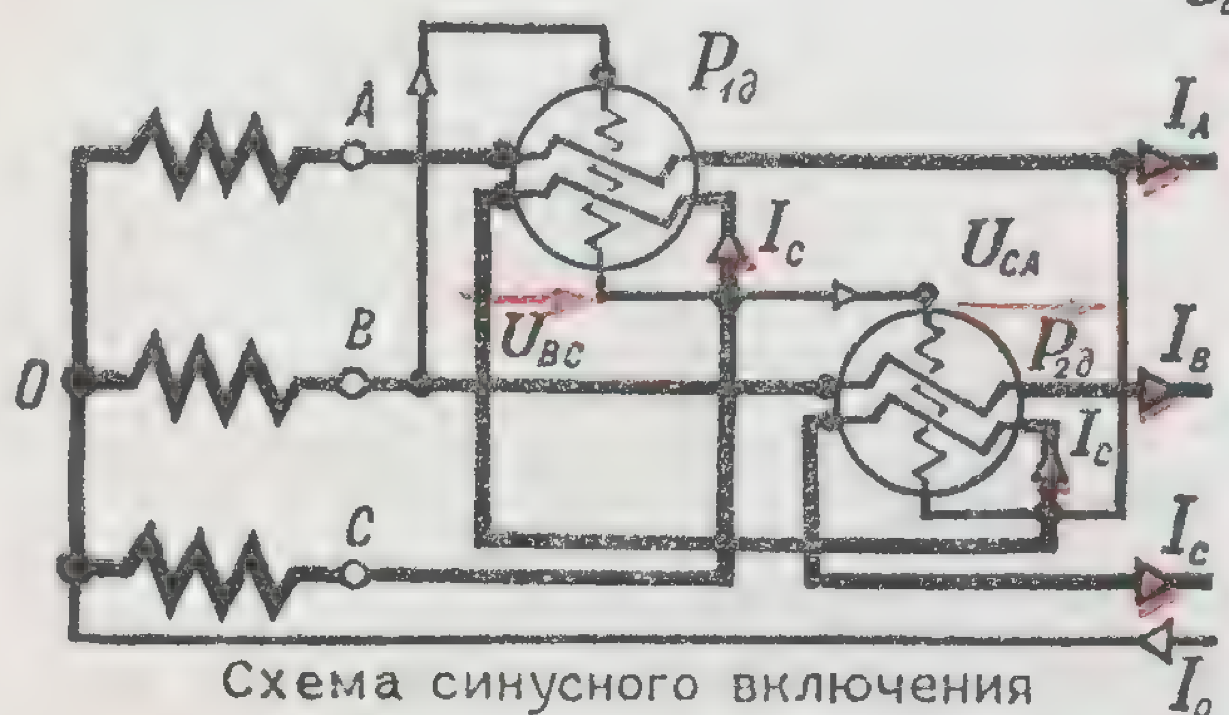
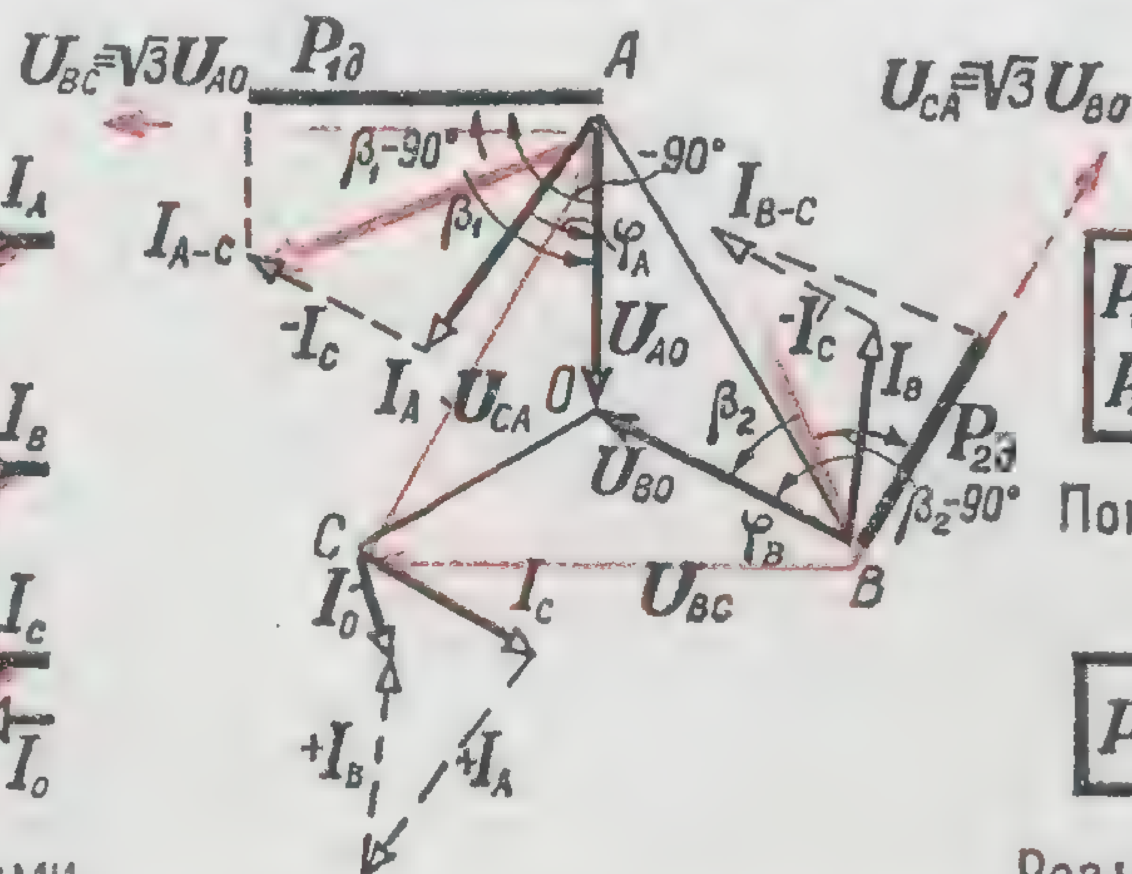


Схема синусного включения двух активных ваттметров с дифференциальными токовыми обмотками



$P_{1д}=U_{BC}I_{A-C}\cos(\beta_1-90^\circ)$
$P_{2д}=U_{CA}I_{BC}\cos(\beta_2-90^\circ)$

Показания ваттметров.

$P_r=\frac{1}{\sqrt{3}}(P_{1д}+P_{2д})$ вар

Реактивная мощность

$$\dot{P}=P_a-jP_r=\hat{U}_{A0}\dot{I}_A+\hat{U}_{B0}\dot{I}_B-(\hat{U}_{A0}+\hat{U}_{B0})\dot{I}_C=\hat{U}_{A0}(\dot{I}_A-\dot{I}_C)+\hat{U}_{B0}(\dot{I}_B-\dot{I}_C)=\hat{U}_{A0}\dot{I}_{A-C}+\hat{U}_{B0}\dot{I}_{B-C}=$$
$$=U_{A0}I_{A-C}\cos\beta_1+U_{B0}I_{B-C}\cos\beta_2-j(U_{A0}I_{A-C}\sin\beta_1+U_{B0}I_{B-C}\sin\beta_2).$$

Реактивная мощность: $P_r=U_{A0}I_{A-C}\sin\beta_1+U_{B0}I_{B-C}\sin\beta_2=\frac{1}{\sqrt{3}}U_{BC}I_{A-C}\cos(\beta_1-90^\circ)+\frac{1}{\sqrt{3}}U_{CA}I_{B-C}\cos(\beta_2-90^\circ)=\frac{1}{\sqrt{3}}(P_{1д}+P_{2д})$

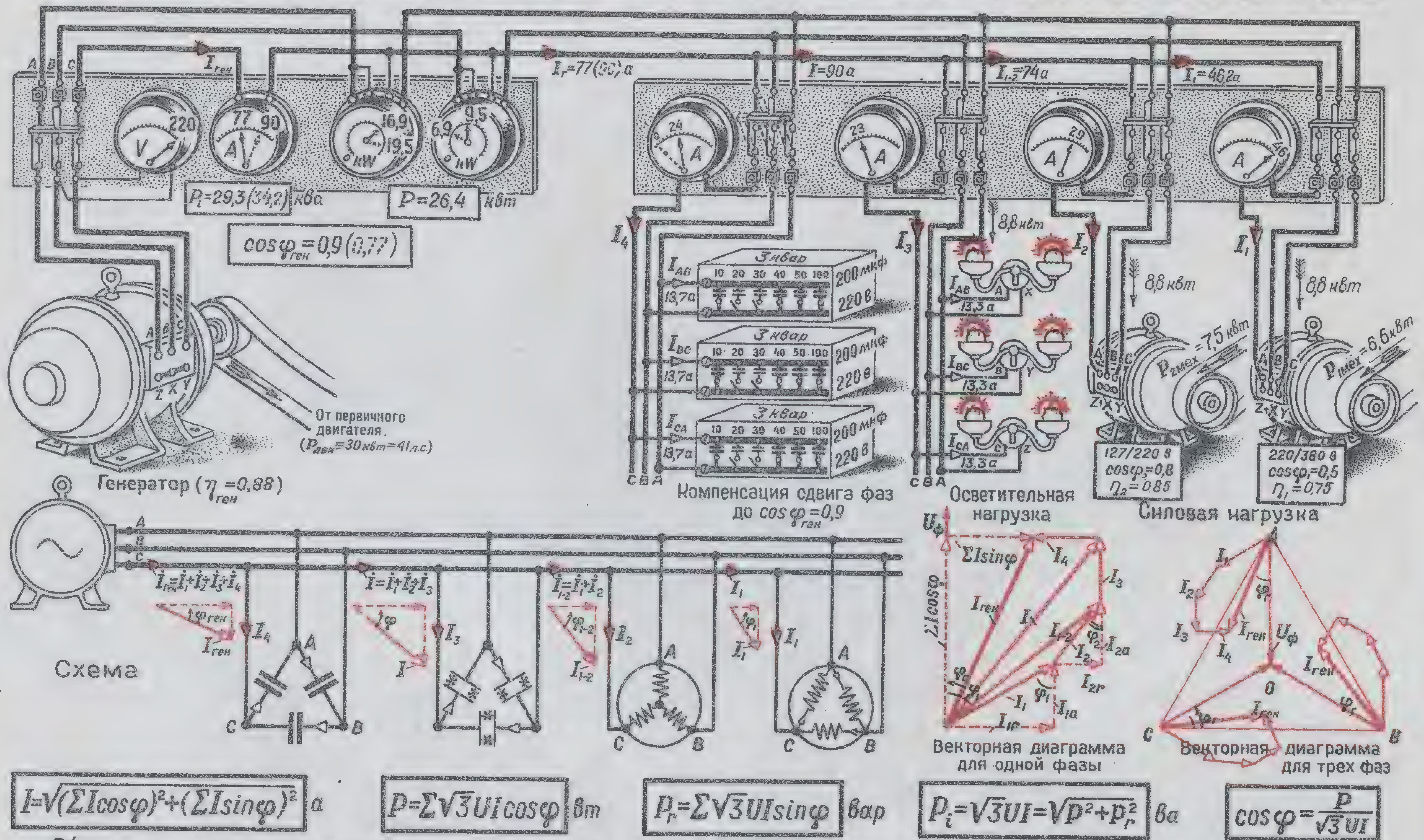
доказательство

Метод двух ваттметров с дифференциальными токовыми обмотками

(произвольная нагрузка фаз при трех-или четырехпроводной системе)

Э.И.Расовский

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА



Общие ток, мощность и коэффициент мощности при равномерной нагрузке потребителей трехфазного тока

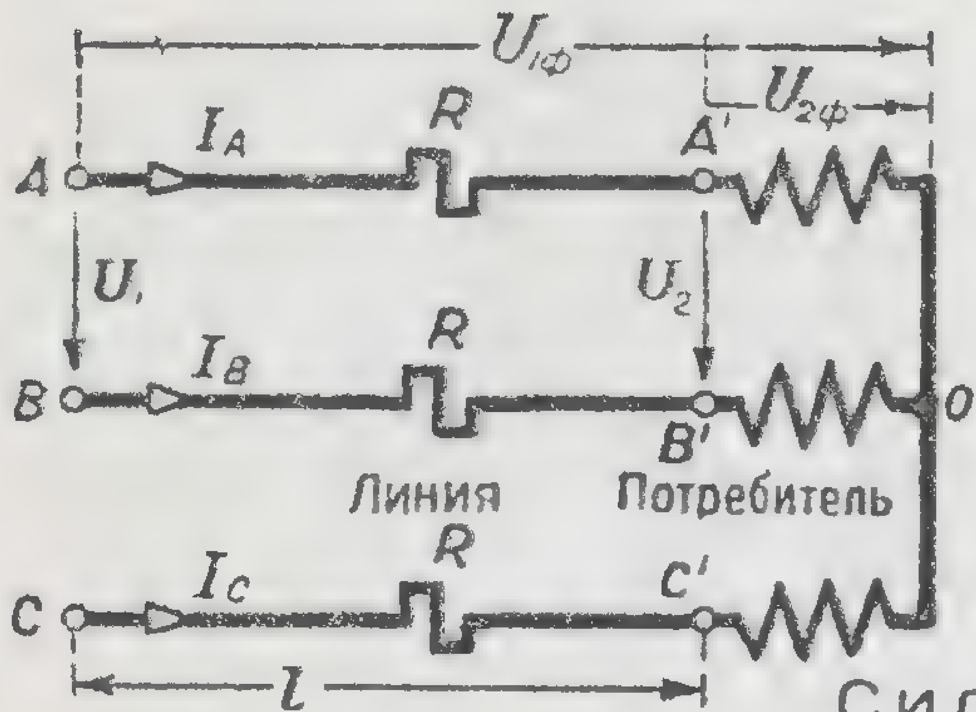
Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков   Подписано к печати 15-X-55 г.   Зак. Р-44 Отпечатано ЛНФ в 1955 г

ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ

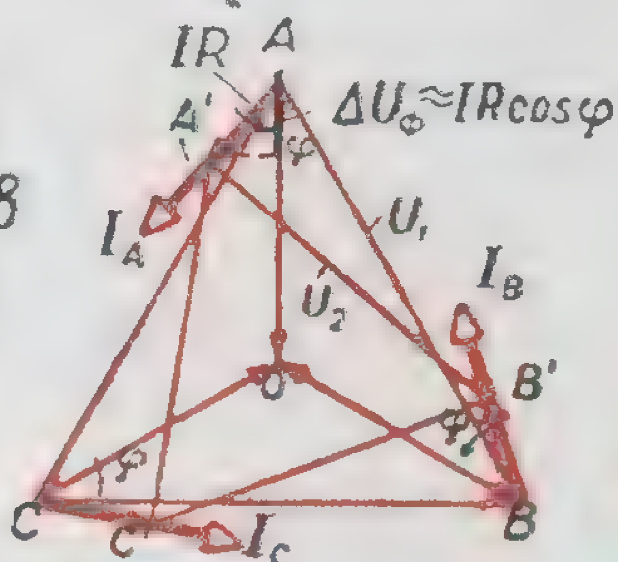


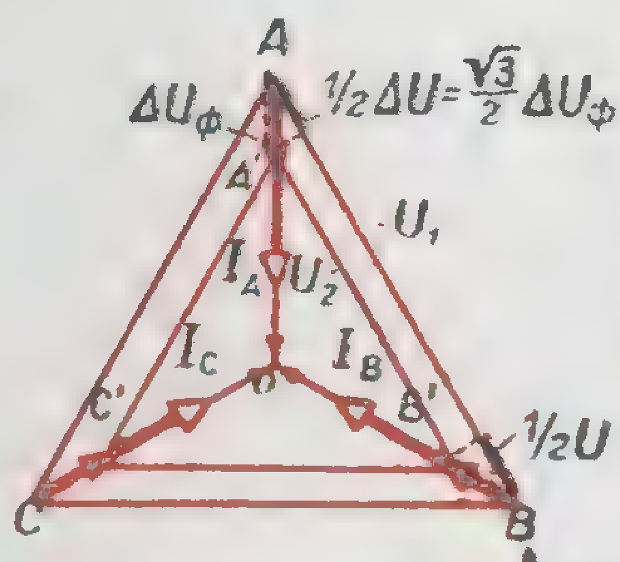
Низковольтная воздушная линия



$$\Delta U_ф = U_{1ф} - U_{2ф} \approx I\cos\varphi \frac{l}{\gamma s} \text{ в}$$
$$\Delta U = U_1 - U_2 = \sqrt{3}\,\Delta U_ф$$

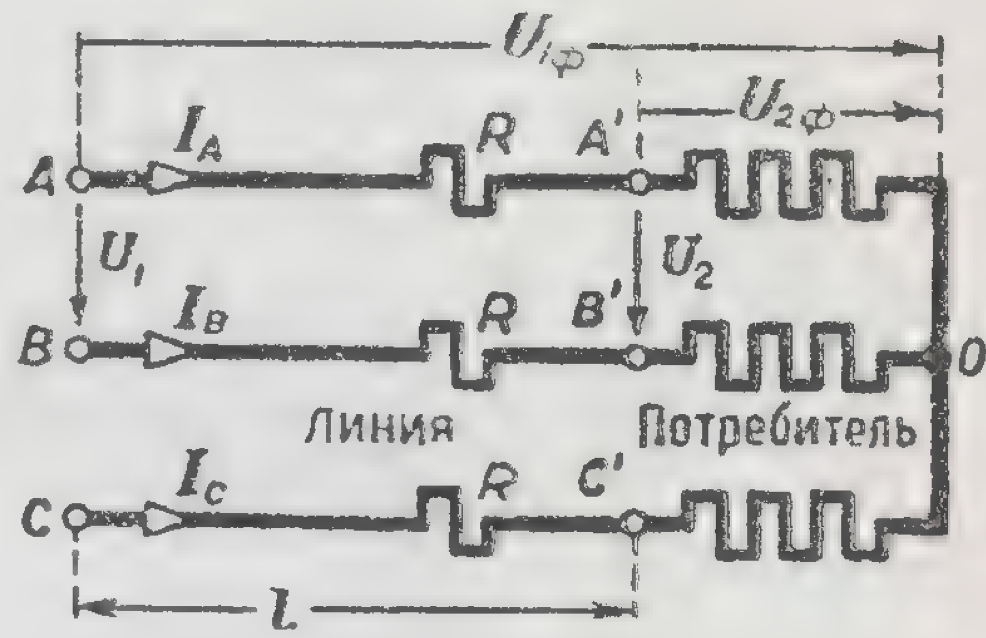
Потеря напряжения





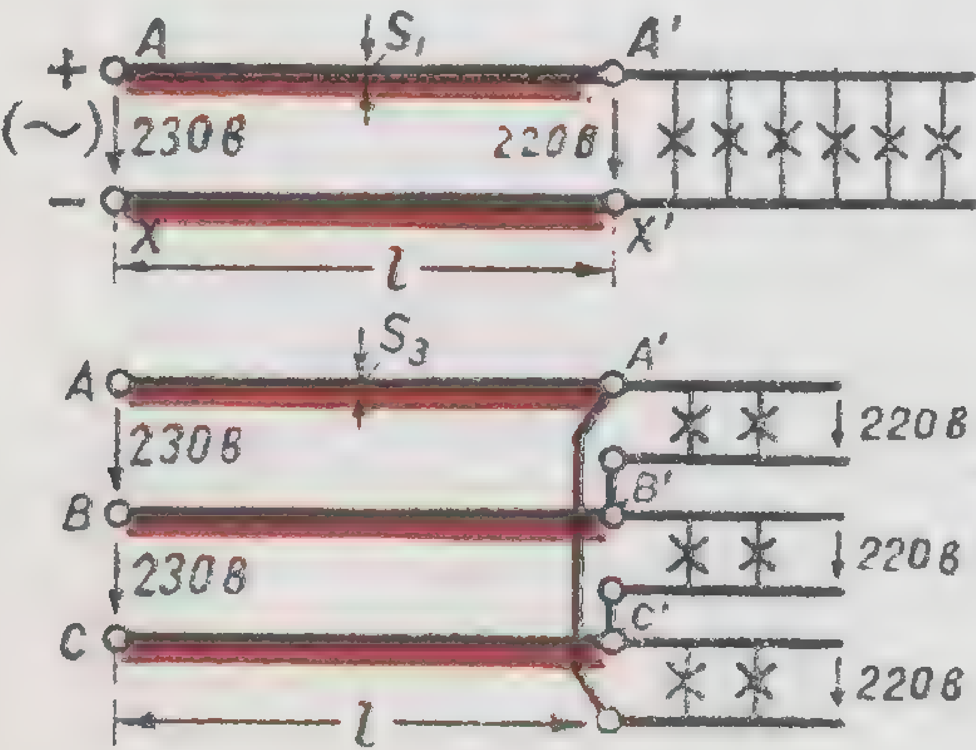
$$\Delta U_ф = I\frac{l}{\gamma s} \text{ в}$$
$$\Delta U = \sqrt{3}\,\Delta U_ф$$

Потеря напряжения



Силовая нагрузка — Активная нагрузка

Потеря напряжения в низковольтной трехфазной линии

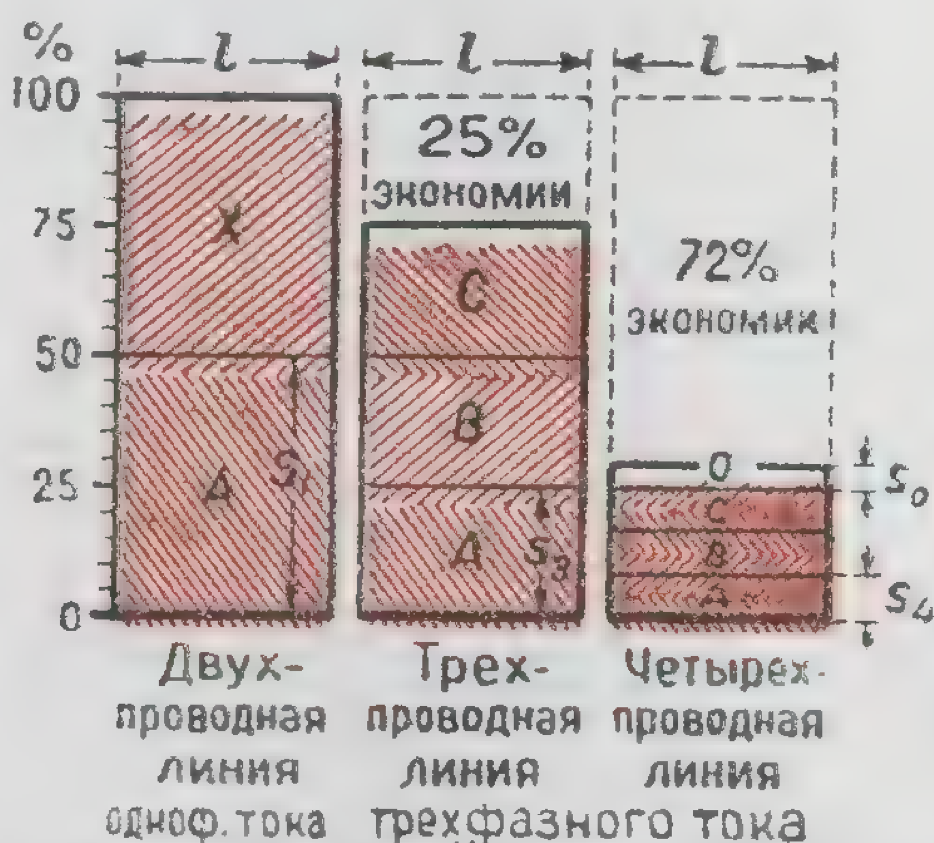


$$S_1 = \frac{200 \cdot Pl}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U^2} \text{ мм}^2$$

Сечение

$$S_3 = \frac{100 \cdot Pl}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U^2} \text{ мм}^2$$

Сечение

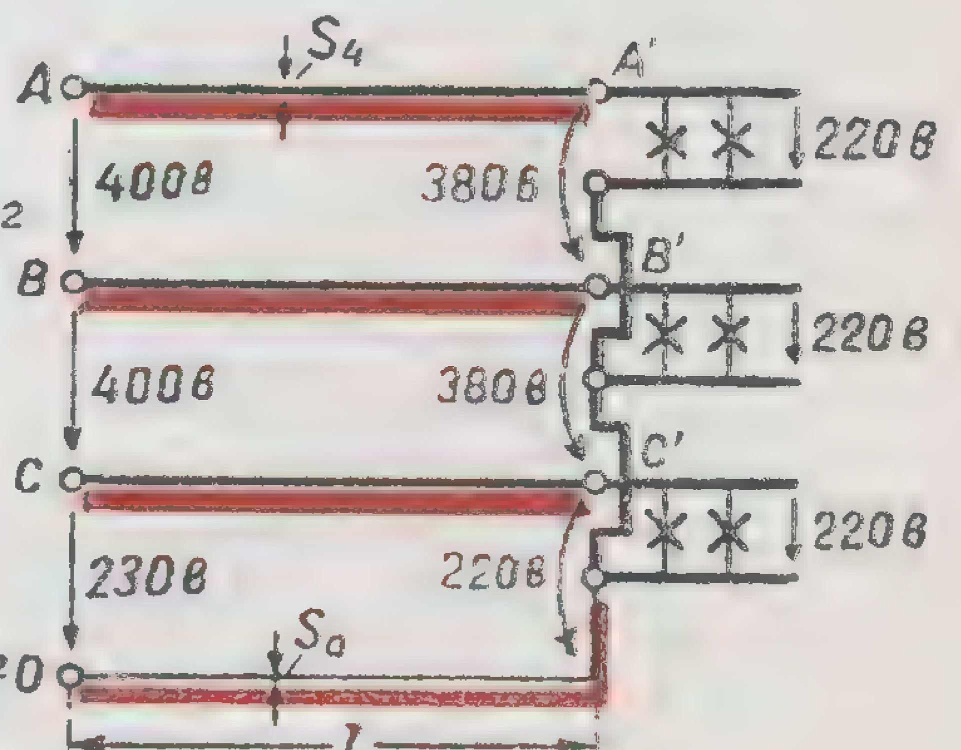


$$S_4 = \frac{100 \cdot Pl}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U^2} \text{ мм}^2$$

Сечение

$$S_3 = 1/2\,S_1,$$
$$S_4 = 1/3\,S_3 = 1/6\,S_1,$$
$$S_0 = 1/2 \div 1/3\,S_4 \text{ мм}^2$$

Сопоставление сечений



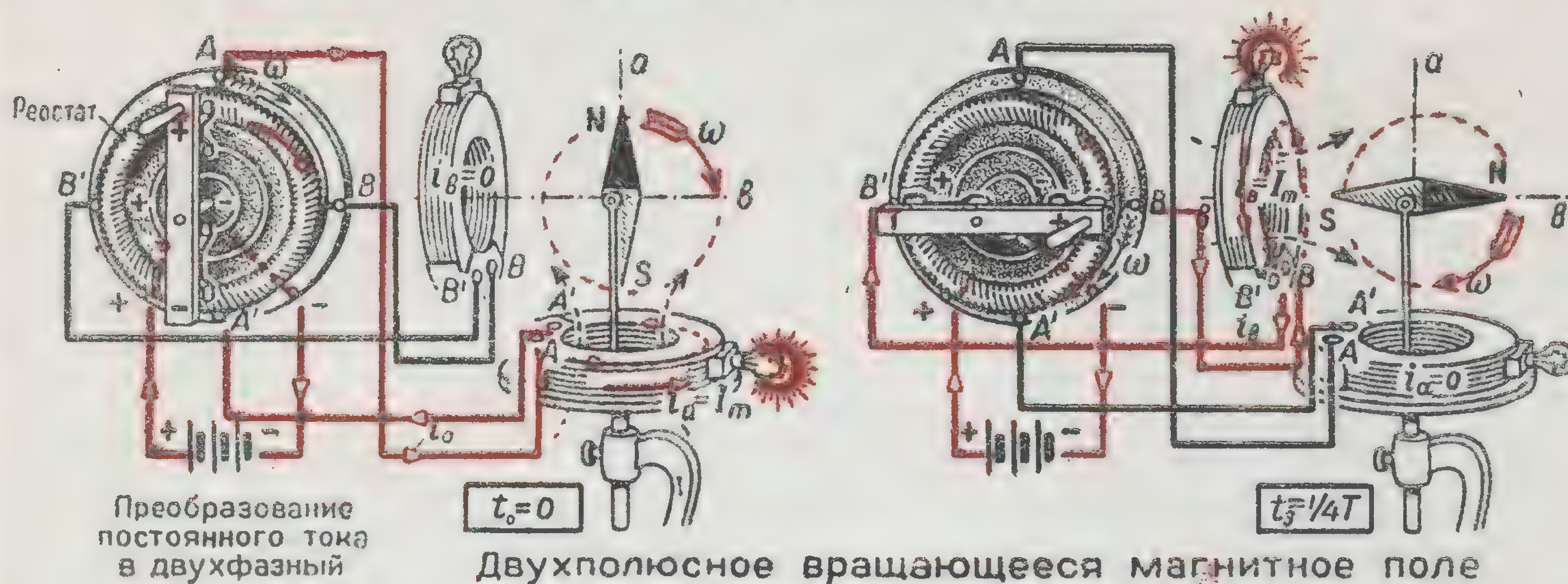
Сравнительный вес проводов

при передаче одинаковой мощности постоянным, однофазным и трехфазным током при одном и том же напряжении потребителя

Э.И.Расовский

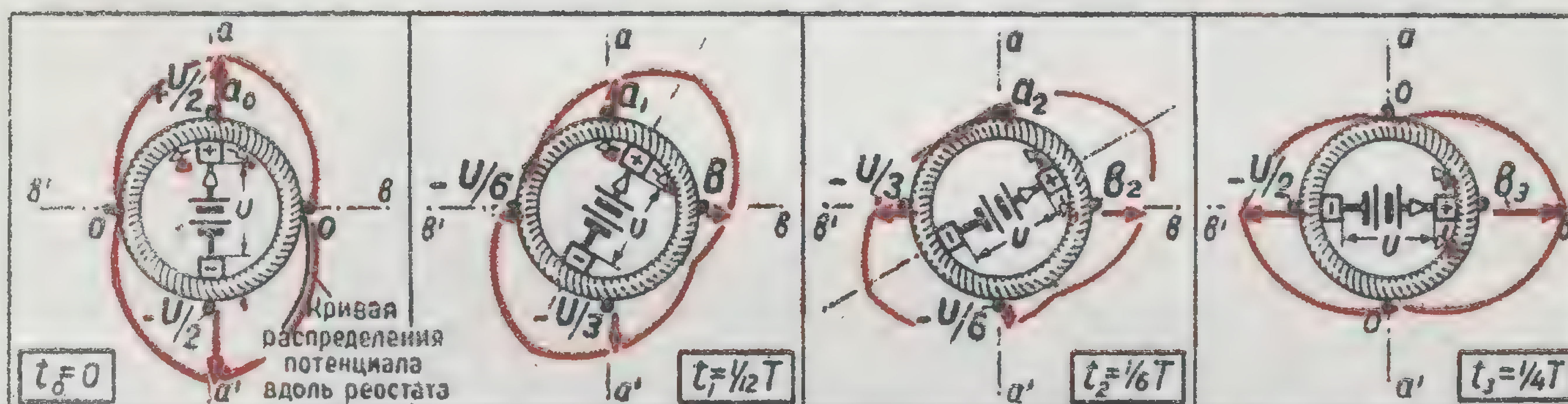
Худ. А.Меньшиков

ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
(ДВУХФАЗНОЕ)

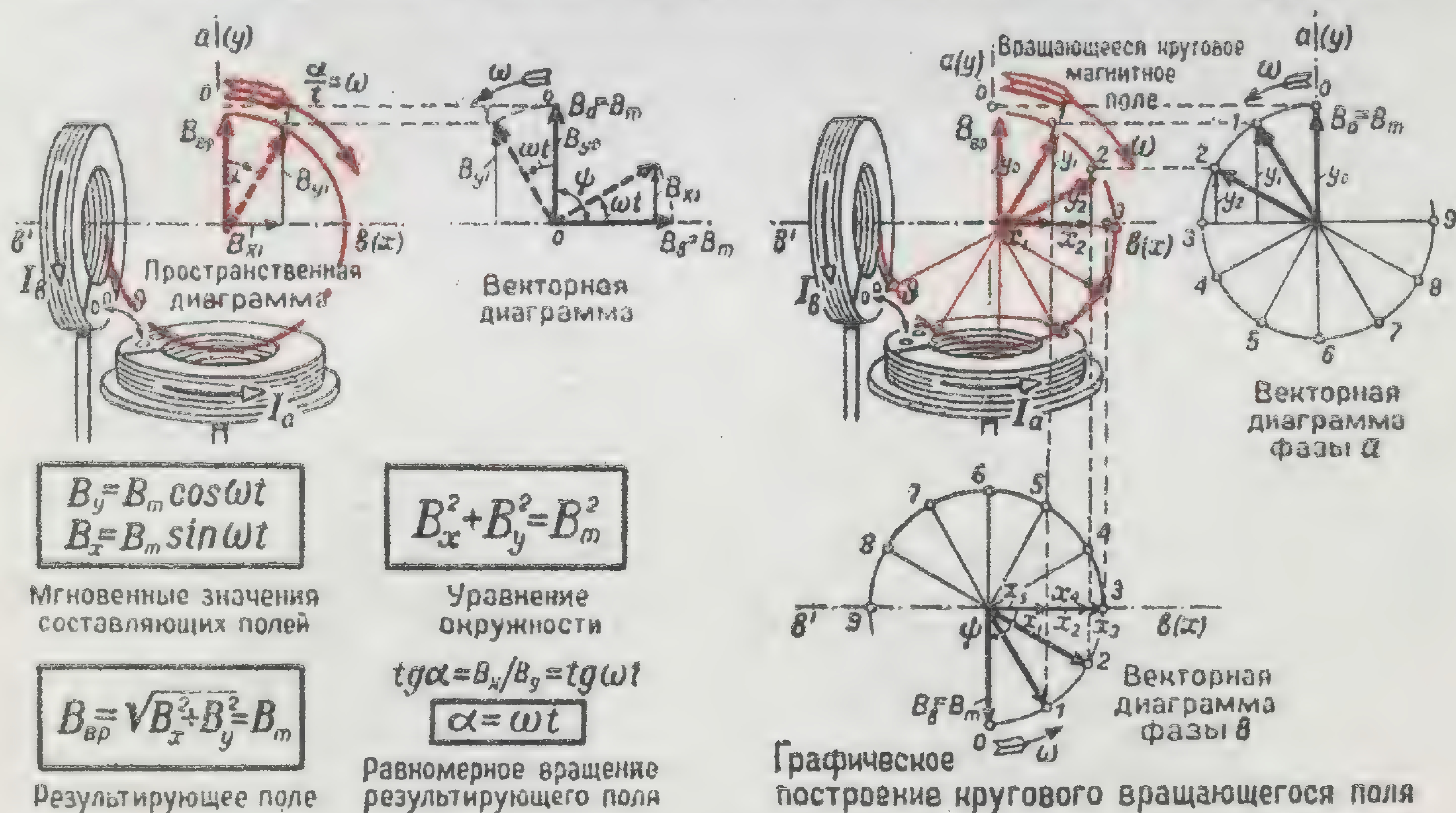


Преобразование постоянного тока в двухфазный

Двухполюсное вращающееся магнитное поле



Мгновенные напряжения на зажимах преобразователя через интервалы в 1/12 периода (30°)

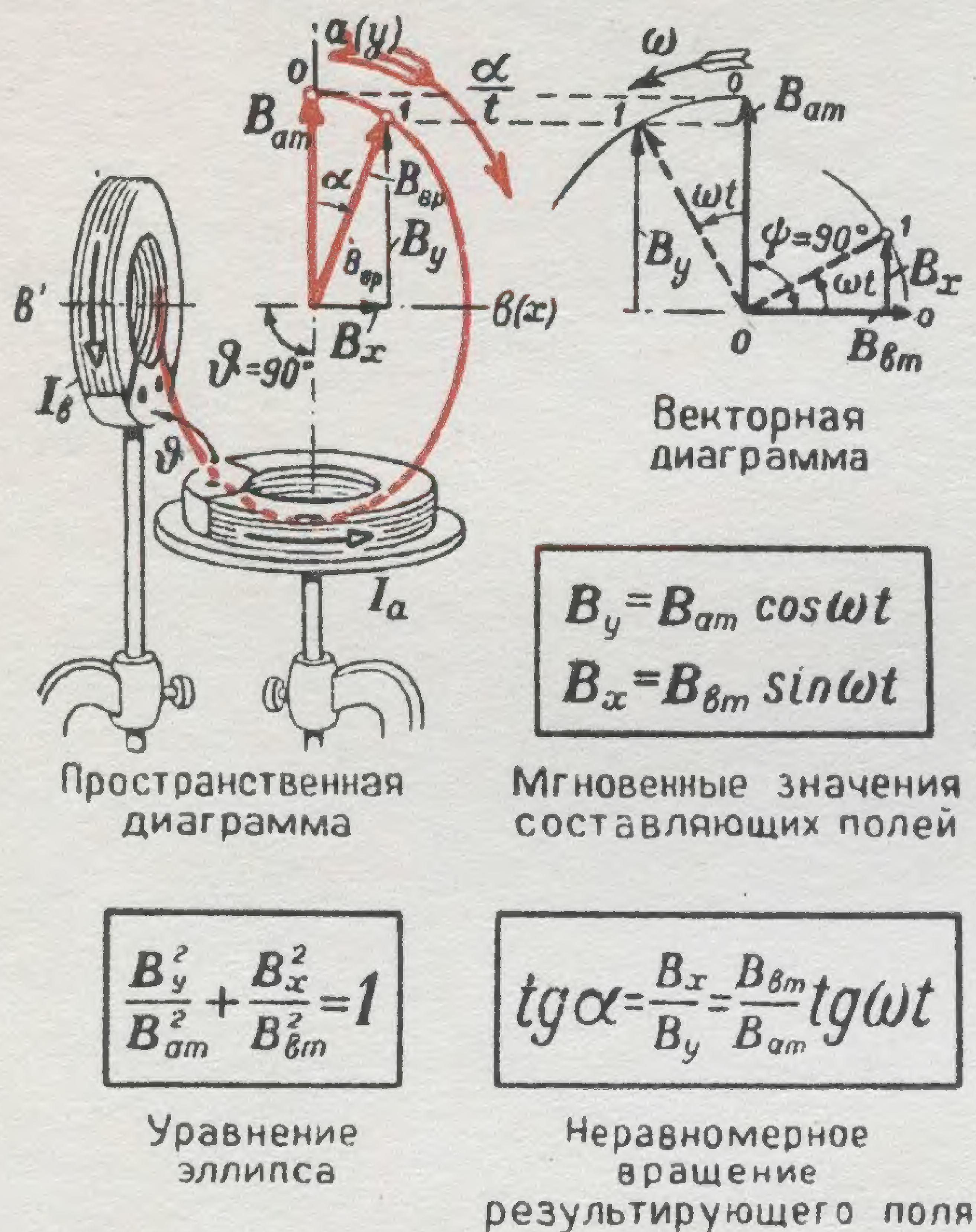


В результате наложения двух одинаковых пульсирующих магнитных полей, сдвинутых в пространстве (ϑ) и во времени (ψ) на 90°, образуется **неизменное** по величине и **равномерно** вращающееся в пространстве (круговое) магнитное поле

Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ВРАЩАЮЩЕЕСЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



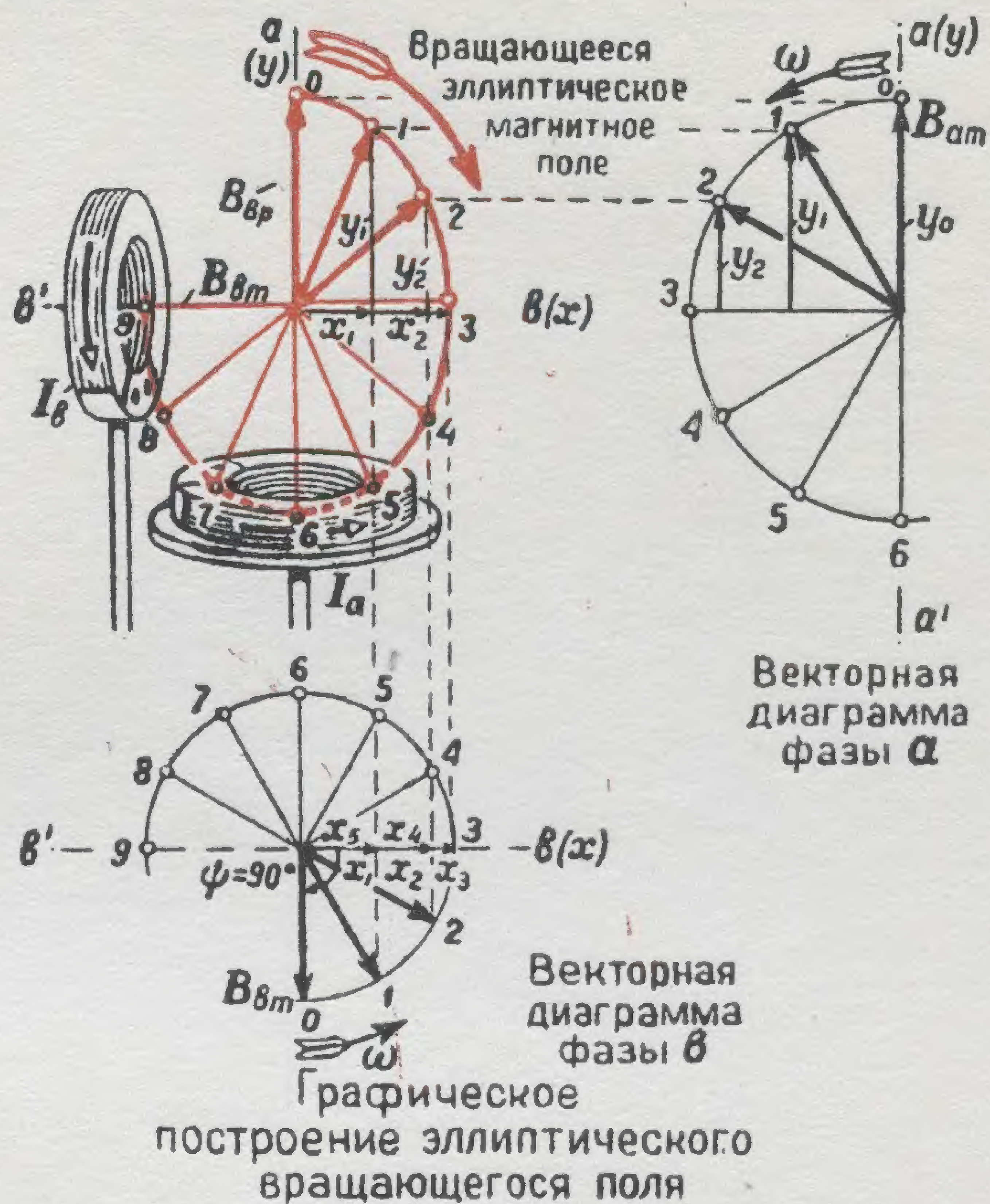
$$B_y = B_{am}\cos\omega t$$
$$B_x = B_{вm}\sin\omega t$$

$$\frac{B_y^2}{B_{am}^2} + \frac{B_x^2}{B_{вm}^2} = 1$$

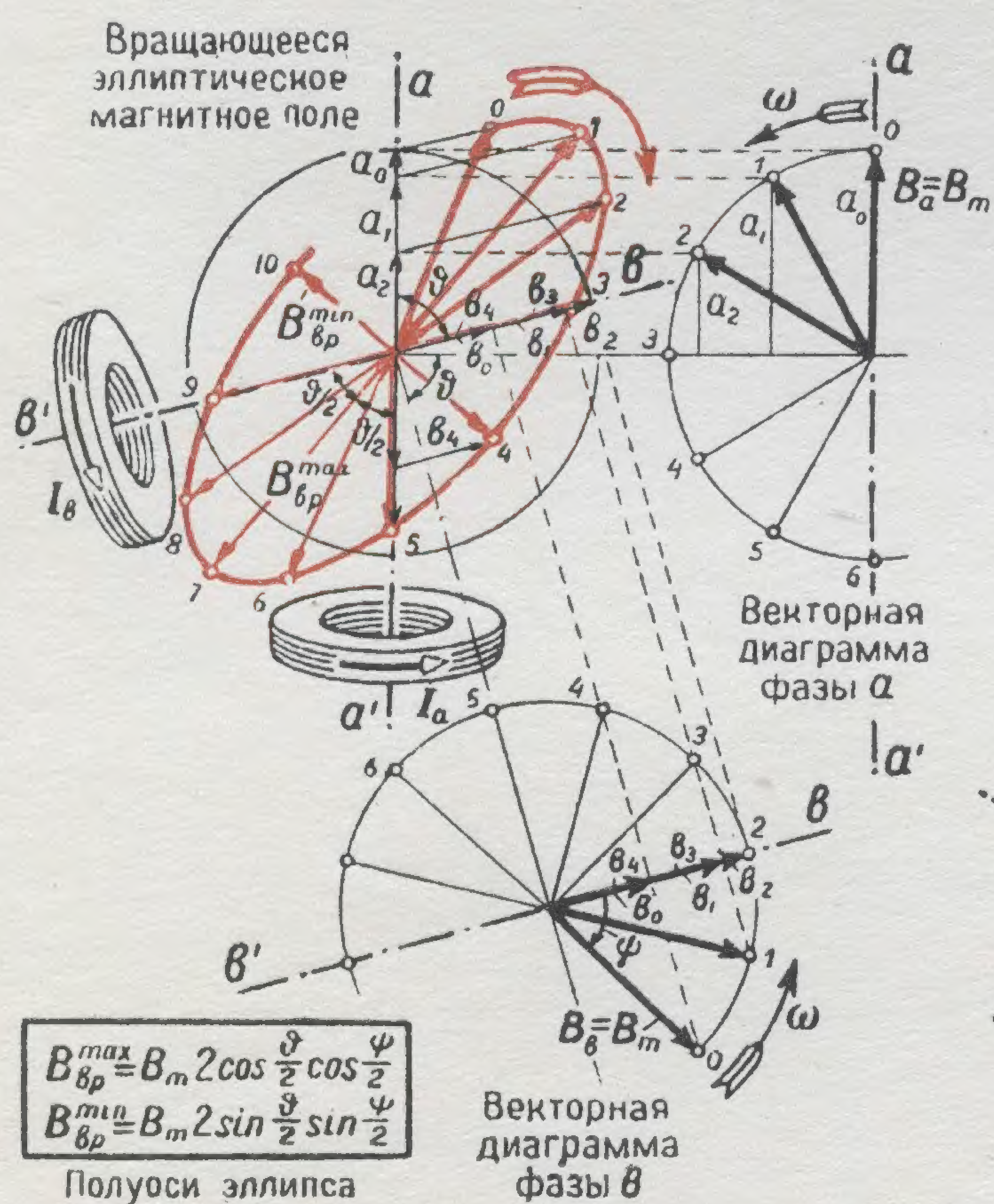
Уравнение эллипса

$$tg\alpha = \frac{B_x}{B_y} = \frac{B_{вm}}{B_{am}} tg\omega t$$

Неравномерное вращение результирующего поля



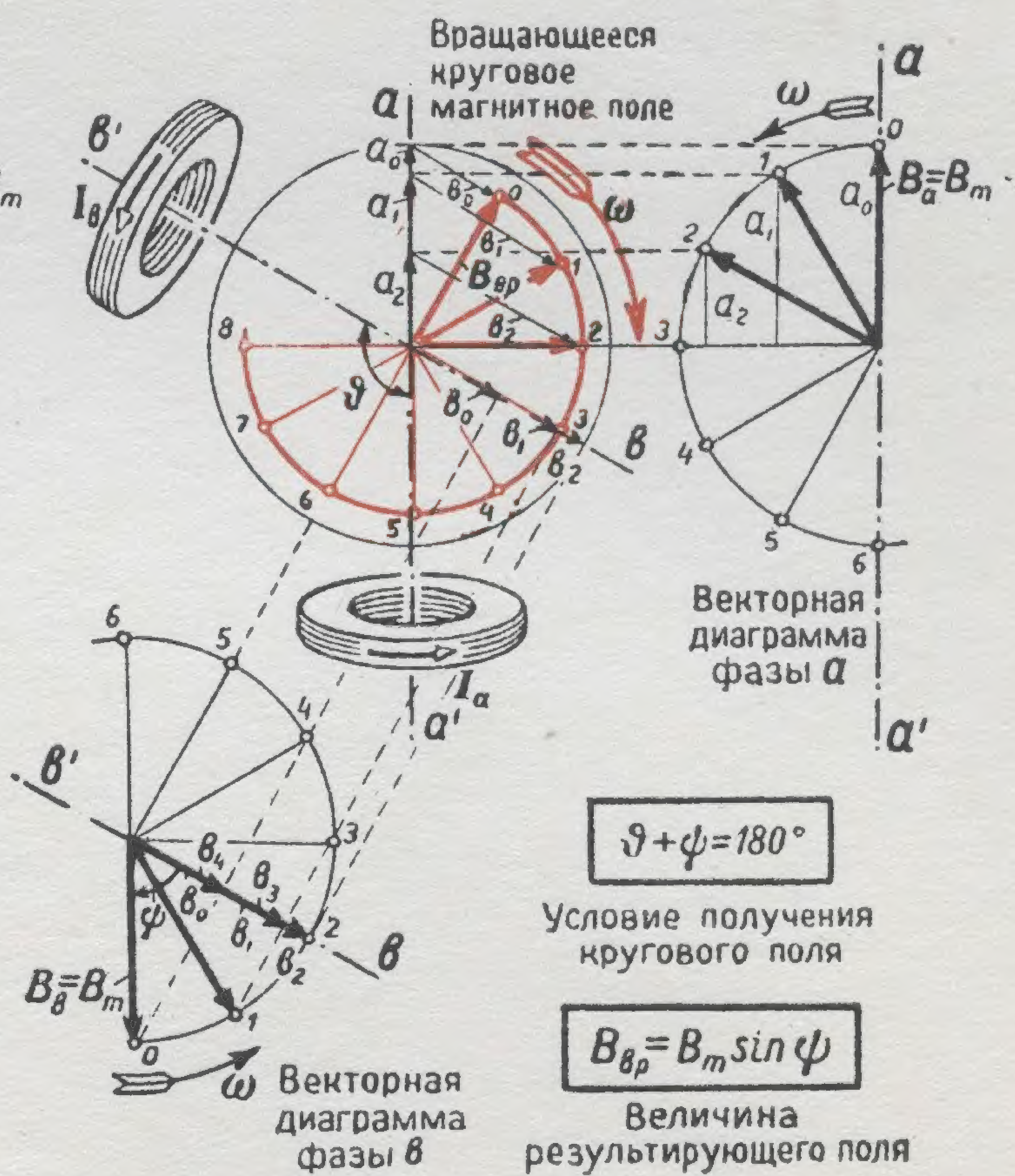
Наложение двух **неодинаковых по величине** пульсирующих магнитных полей, сдвинутых в пространстве (ϑ) и во времени (ψ) на 90°



$$B_{вр}^{max} = B_m 2\cos\frac{\vartheta}{2}\cos\frac{\psi}{2}$$
$$B_{вр}^{min} = B_m 2\sin\frac{\vartheta}{2}\sin\frac{\psi}{2}$$

Полуоси эллипса

Наложение двух **одинаковых** пульсирующих полей, произвольно сдвинутых в пространстве (ϑ) и во времени (ψ)



$$\vartheta + \psi = 180°$$

Условие получения кругового поля

$$B_{вр} = B_m \sin\psi$$

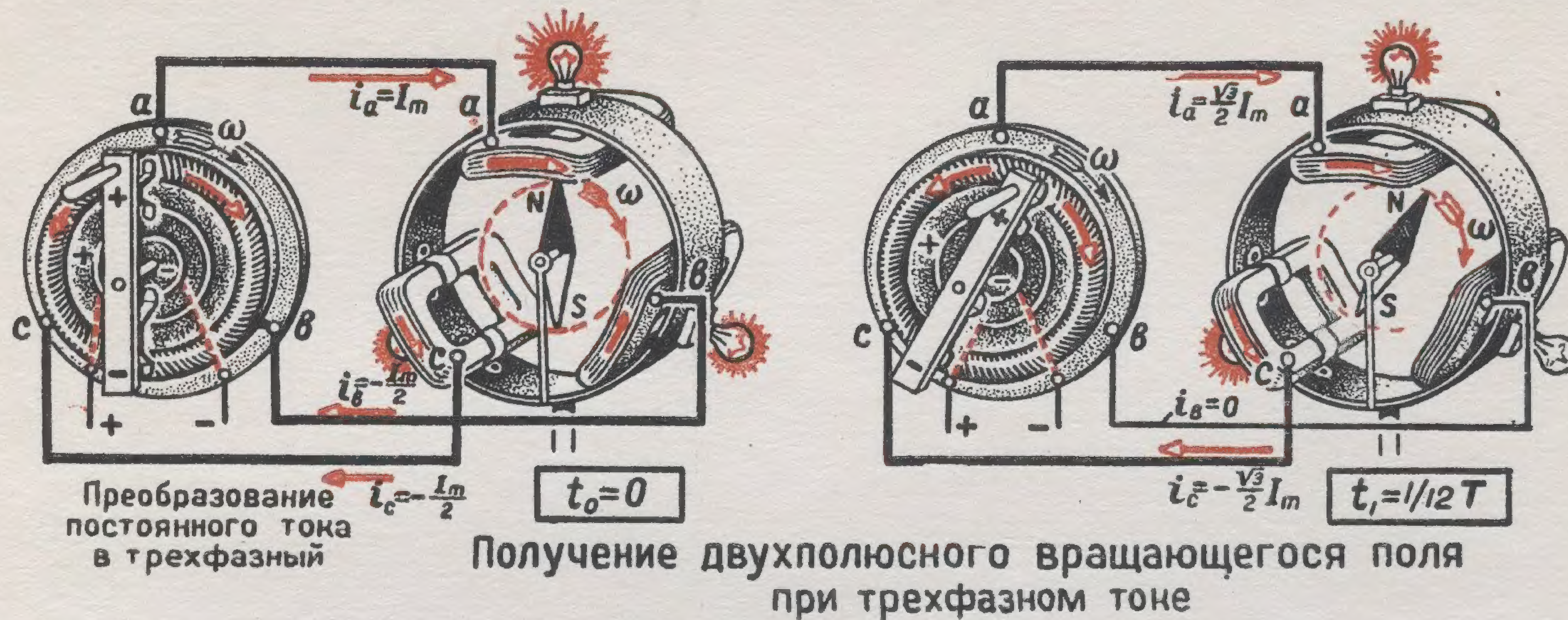
Величина результирующего поля

Наложение двух **одинаковых** пульсирующих полей, сдвинутых в пространстве (ϑ) на 120°, а во времени (ψ) на 60°

Э. И. Расовский

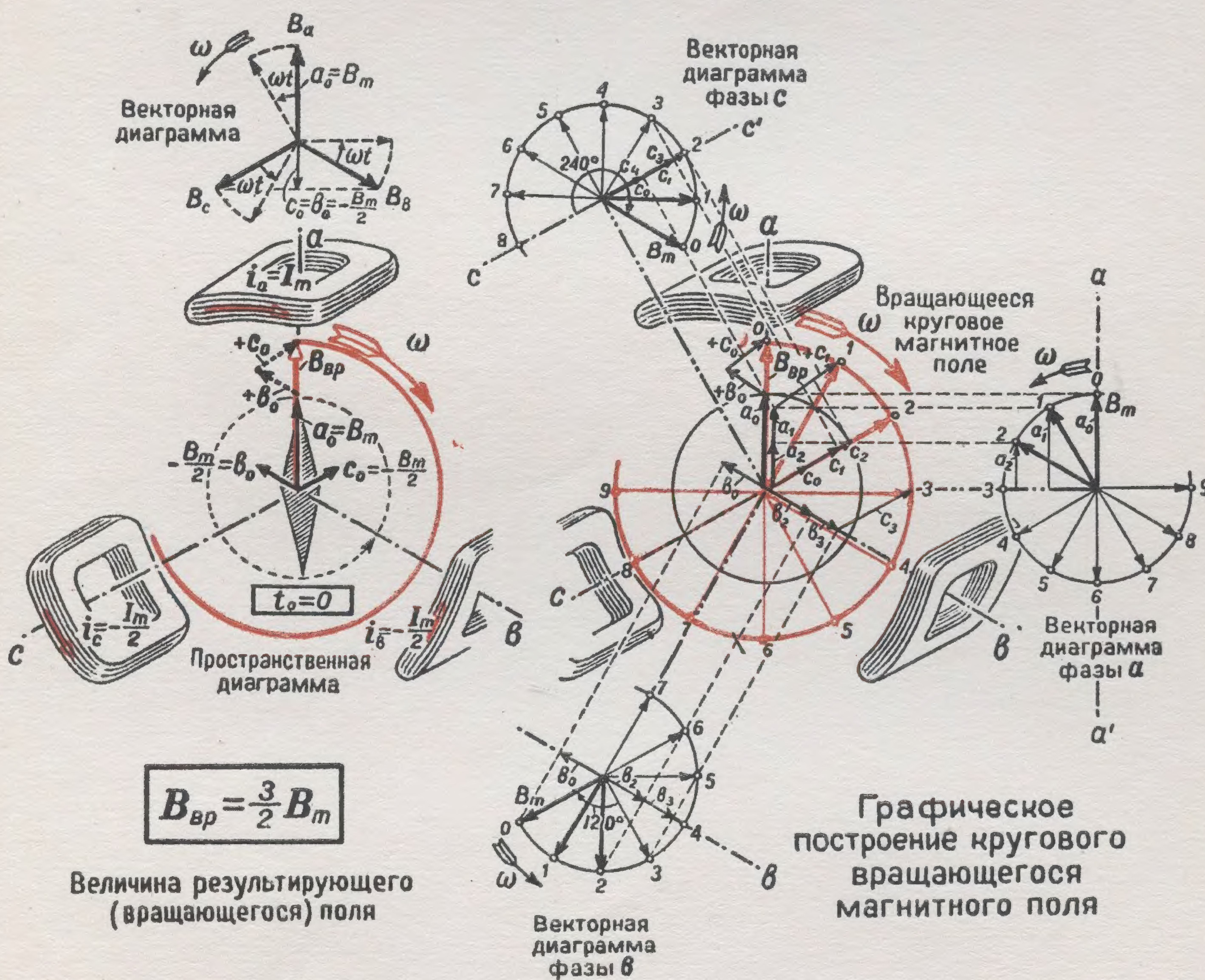
Худ А Меньшиков

ДВУХПОЛЮСНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Преобразование постоянного тока в трехфазный

Получение двухполюсного вращающегося поля при трехфазном токе



$$B_{вр} = \frac{3}{2} B_m$$

Величина результирующего (вращающегося) поля

Графическое построение кругового вращающегося магнитного поля

В результате наложения трех одинаковых пульсирующих магнитных полей, сдвинутых в пространстве (ϑ) и во времени (φ) на 120°, образуется **неизменное** по величине и вращающееся в пространстве (**круговое**) магнитное поле

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

МНОГОПОЛЮСНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

$t=0$

$i_A=I_m$ $i_B=-I_m/2$ $i_C=-I_m/2$

$\omega t=0$

Максимум тока в фазе А

Вращающееся магнитное поле направлено вдоль оси катушки А

$t=\frac{1}{3}T$

$i_A=-I_m/2$ $i_B=I_m$ $i_C=-I_m/2$

$\omega t=120^\circ$

Максимум тока в фазе В

Вращающееся магнитное поле направлено вдоль оси катушки В

$t=\frac{2}{3}T$

$i_A=-I_m/2$ $i_B=-I_m/2$ $i_C=I_m$

$\omega t=240^\circ$

Максимум тока в фазе С

Вращающееся магнитное поле направлено вдоль оси катушки С

p=1 p=2

Зависимость скорости вращающегося магнитного поля от числа пар полюсов



$$n_1=\frac{60f}{p}\ \frac{об}{мин.}$$

Синхронное число оборотов вращающегося магнитного поля

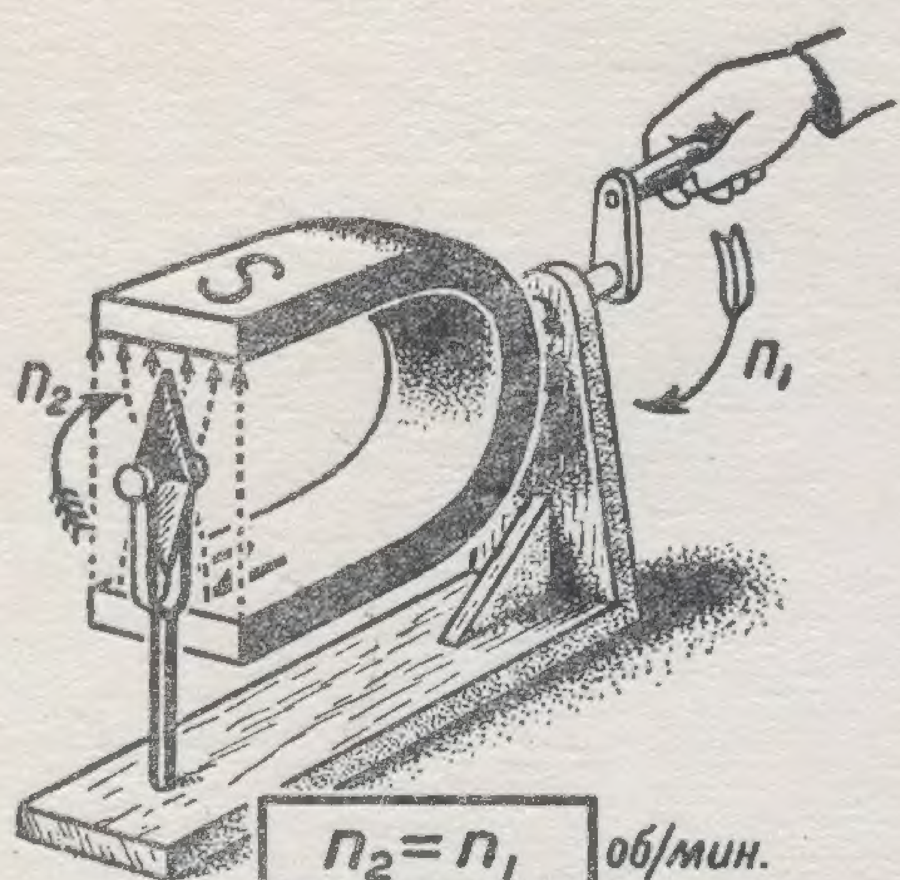
Число пар полюсов p	1	2	3	4
Число катушек	3	6	9	12
Синхронное число оборотов поля n_1	3000	1500	1000	750

Шестикатушечная обмотка статора трехфазного двигателя

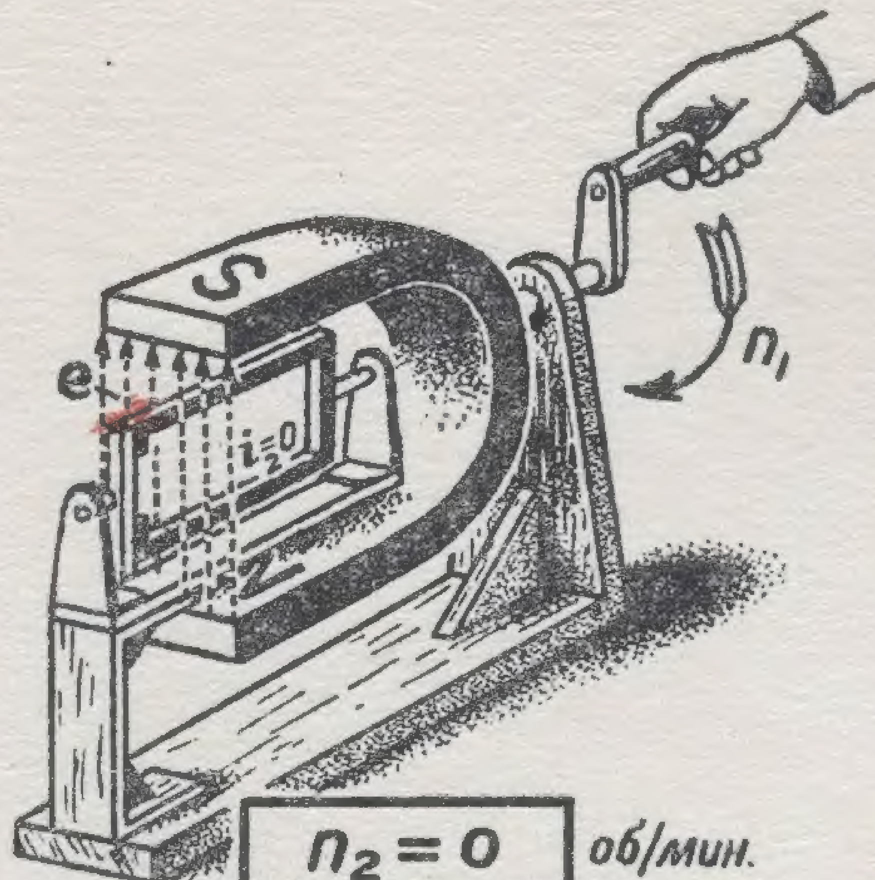
Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

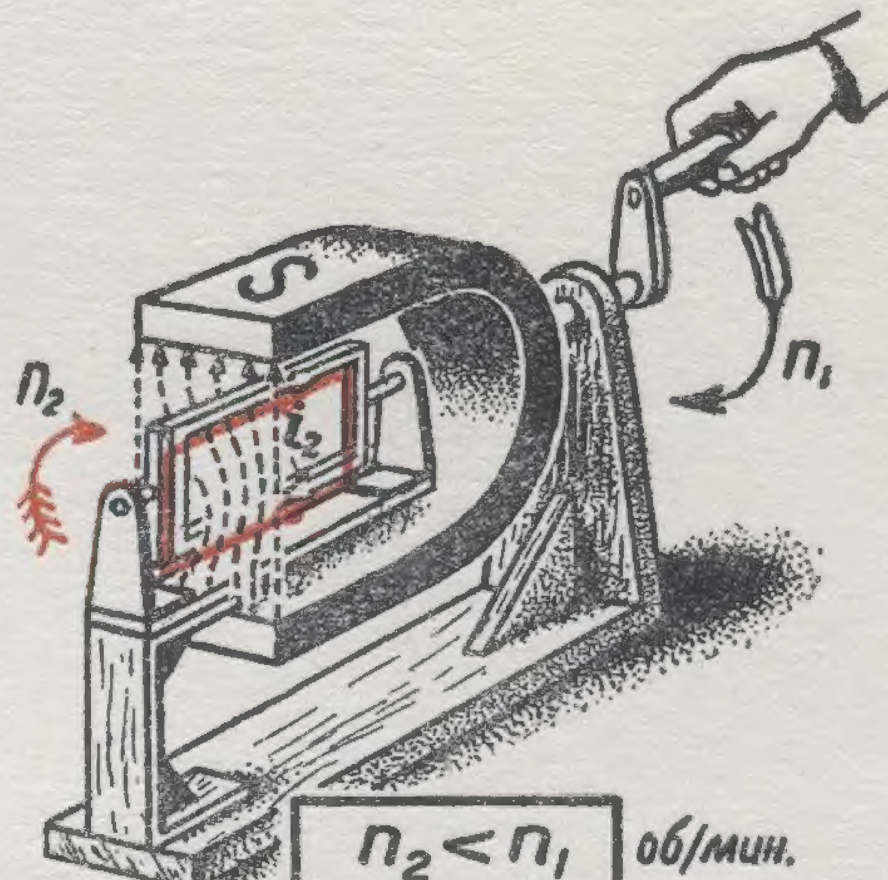
ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



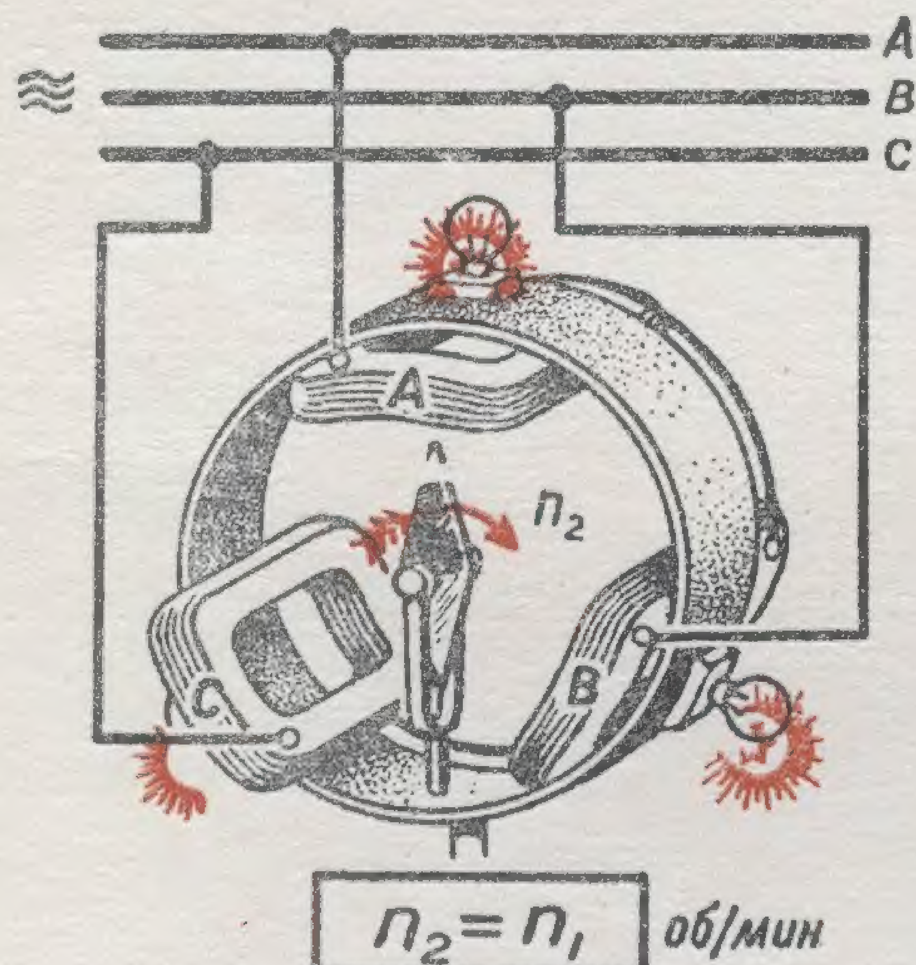
синхронное вращение магнитной стрелки, увлекаемой вращающимся магнитным полем



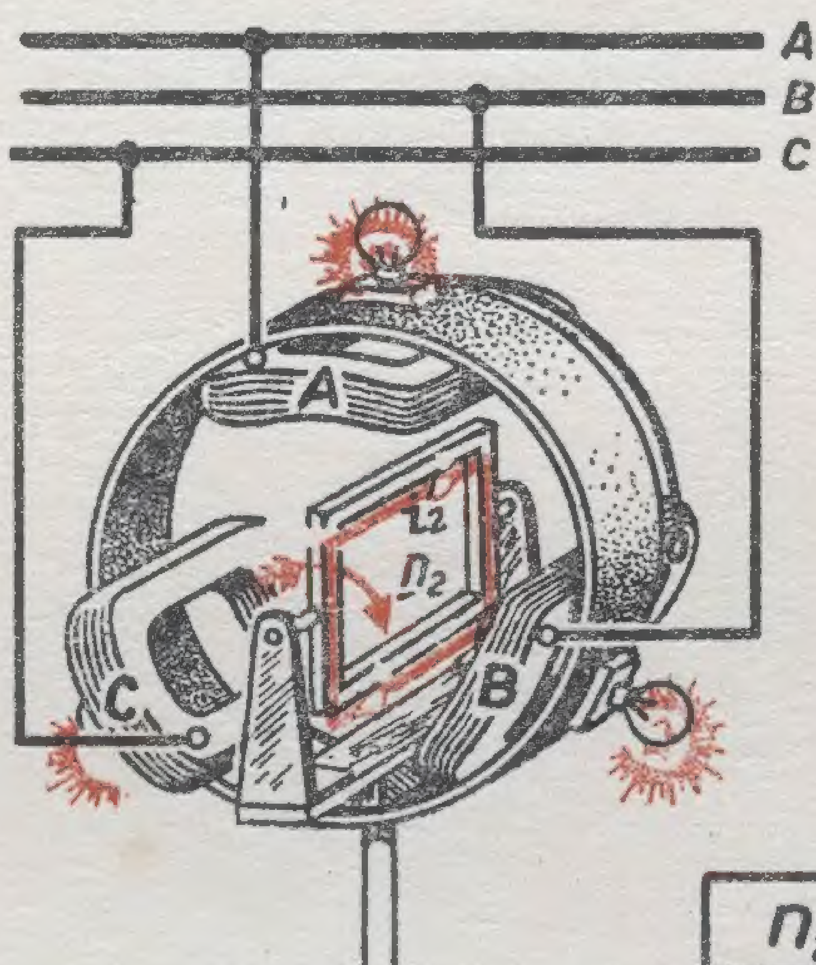
Наведение э.д.с. в РАЗОМКНУТОМ витке вращающимся магнитным полем



АСИНХРОННОЕ вращение ЗАМКНУТОГО витка, увлекаемого вращающимся магнитным полем

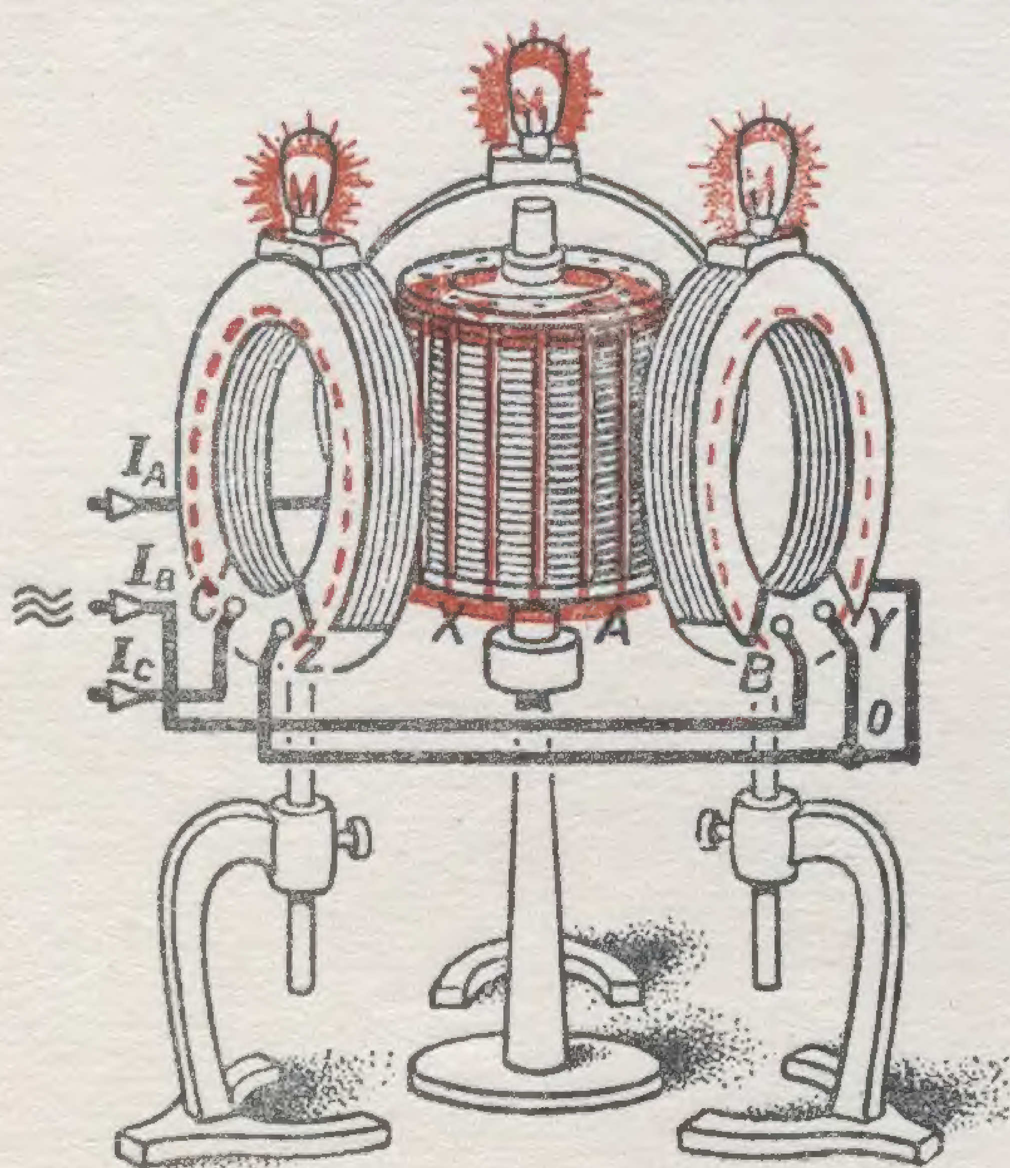


синхронное вращение магнитной стрелки

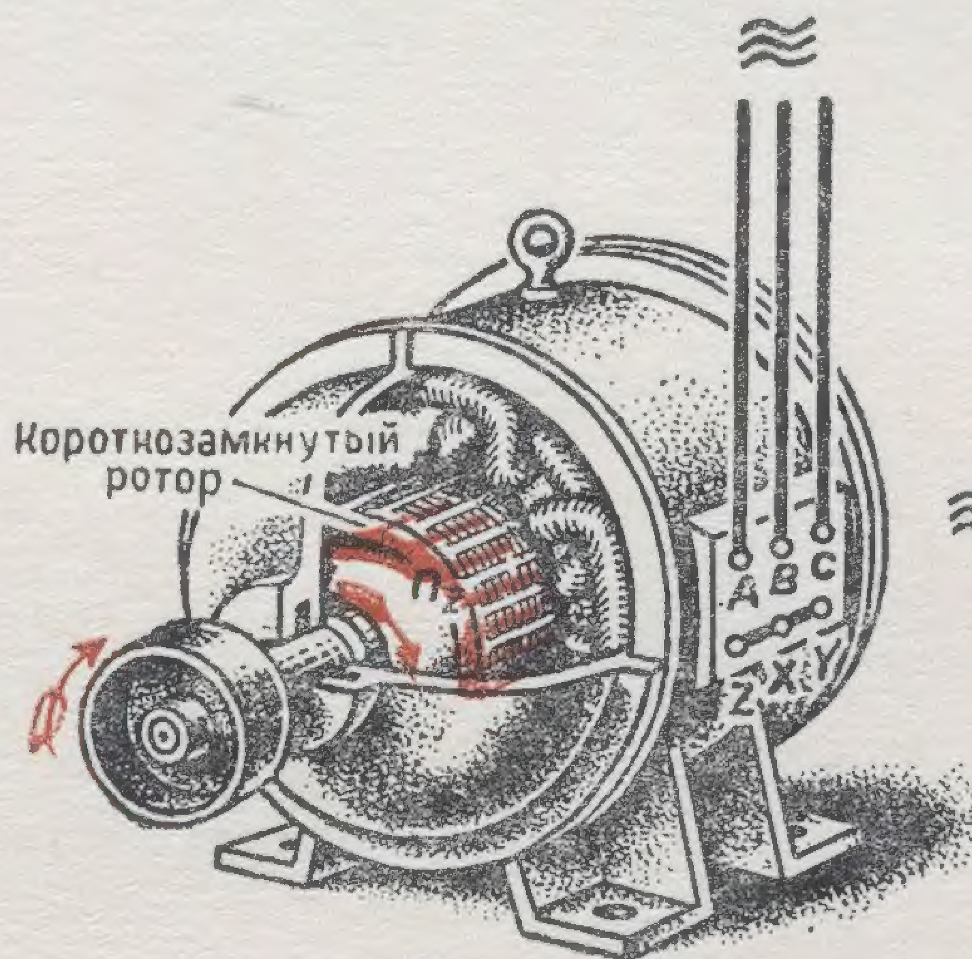


$n_2 < n_1$ об/мин.

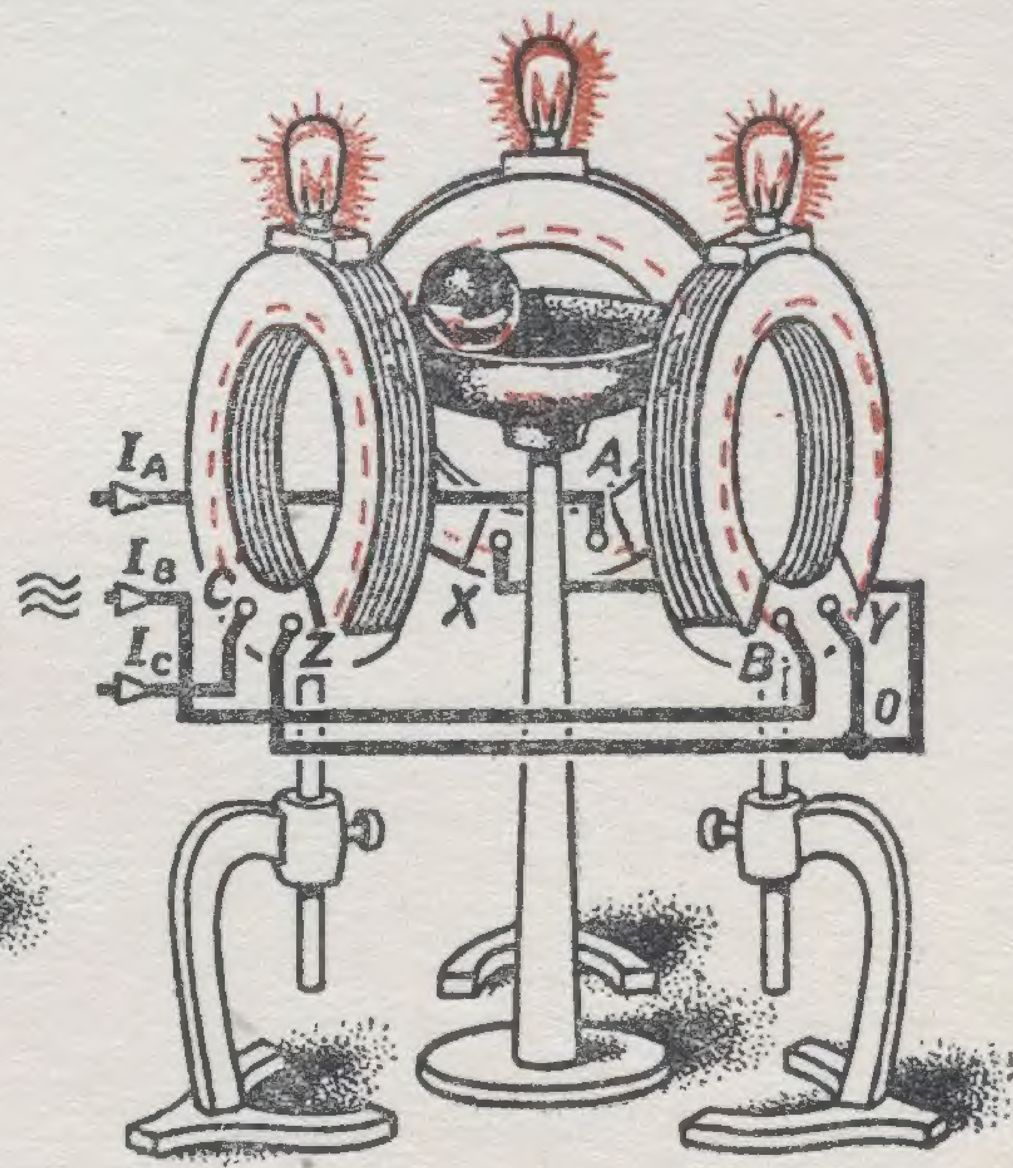
АСИНХРОННОЕ вращение замкнутого витка и беличьего колеса



Вращение короткозамкнутого ротора в поле трех катушек



Асинхронный двигатель (изобретен М.О. Доливо-Добровольским в 1891 г.)



Вращение стального шара по часовой стрелке и качение его против часовой стрелки

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков